

PROYECTO FIN DE CARRERA

REVESTIMIENTO REFRACTARIO EN HORNO DE SOLERA GALOPANTE



**Francisco Martín Mora
I.T.I Mecánica**

Tutor; Domingo Santana Santana

INDICE:

| | | |
|-----------|---|----------------|
| 1. | <u>¿Qué es un material refractario?</u> | Pág.2 |
| 1.1 | Clasificación de los materiales refractarios | |
| 2. | <u>Introducción al Hierro y al Acero</u> | Pág.10 |
| 2.1 | Proceso de fabricación del Hierro | |
| 2.1.1 | Introducción | |
| 2.1.2 | La chatarra. | |
| 2.2 | Principios básicos para la obtención del acero | |
| 2.2.1 | Fabricación del acero | |
| 2.2.2 | La colada continua | |
| 2.2.3 | El horno de recalentamiento | |
| 2.2.4 | El tren de laminación | |
| 2.3 | Laminación como proceso de obtención del acero | |
| 2.3.1 | Laminación en Frío | |
| 2.3.2 | Laminación en caliente | |
| 3. | <u>Hornos de tratamiento Térmico para el acero</u> | Pág.26 |
| 4. | <u>Cálculos para del revestimiento refractario</u> | Pág.34 |
| 4.1 | Materiales a utilizar para la fabricación del revestimiento. | |
| 4.2 | Condiciones de trabajo de un horno en solera galopante. | |
| 4.3 | Cálculos térmicos para diseño de revestimiento refractario. | |
| 4.3.1 | Calculo de la temperatura del techo | |
| 4.3.2 | Cálculo de la temperatura en paredes. | |
| 4.3.3 | Cálculo de la temperatura en solera. | |
| 5. | <u>Diseño del revestimiento en función de cálculos de transferencia de calor</u> | Pág.71 |
| 6. | <u>Fabricación y montaje del revestimiento:</u> | Pág. 79 |
| 6.1 | Moldes previos para la fabricación de las piezas que irán en el horno. | |
| 6.2 | Procesos para la fabricación del revestimiento. Y verificación del montaje de los materiales. | |
| 7. | <u>Conclusiones</u> | Pág.94 |
| 8. | <u>Bibliografía</u> | Pág.95 |
| 9. | <u>TABLAS DE PROPIEDADES DE LOS MATERIALES</u> | Pág.96 |

1. ¿Qué es un material refractario?

Los materiales refractarios son normalmente materiales no metálicos que suelen ser usados para procesos de altas temperaturas en el sector industrial.

Los materiales refractarios se aplican generalmente a temperaturas superiores a 600°. En cuanto a su volumen de estabilidad a la corrosión y desgaste de materiales deben tener una buena química térmica, y resistencia mecánica.

Con el fin de cumplir estos requisitos y de lograr una vida útil larga, los materiales refractarios deben tener la estabilidad de volumen mucho más allá de su temperatura servicio. En consecuencia, se utiliza su estabilidad de volumen como criterio para la clasificación, ya que la estabilidad de volumen depende de la temperatura.

A menudo el nombre de un material refractario se basa en las materias primas utilizadas o de sus componentes.

Además, los términos básicos y ácidos se utilizan a menudo. Estos son tomados de sector de la química, en lo que respecta a los productos refractarios de estos será una referencia a sus componentes químicos basados en los correspondientes ácidos o bases. Esta caracterización puede ser útil porque las atmósferas horno pueden reaccionar de una manera ácida o básica. En consecuencia, la resistencia química de un material refractario debe ser evaluada.

Hay que distinguir siempre entre productos de forma y productos sin forma. Los productos de forma son los materiales que reciben de su forma final antes de abandonar el fabricante. En general, el material es entregado con su tamaño final y está listo para su instalación. Los productos sin forma reciben su forma final durante la instalación, por ejemplo, gunitados, apisonamiento o fundición. Estos son mezclas, morteros, hormigones, fragmentos de fibra, etc.

1.1 Clasificación de los materiales refractarios

Los materiales refractarios pueden clasificarse en base a los siguientes criterios:

1.1.1 De acuerdo con el uso / utilización:

Para construcciones monolíticas
Para reparaciones
Para igualar o para juntas

1.1.2 De acuerdo con su presentación o estado físico:

- Sólido seco
- Plástico
- Pasta

1.1.3 Basada en el método de instalación

Los distintos tipos de utilización pueden ser:

1.1.3.1 Colado – Vertido

Los materiales refractarios se suministran en seco para poder mezclarlos con agua, u otro líquido ligante, y van tomando forma durante la instalación.

A la hora de realizar un revestimiento por colado- vertido, se han de tener en cuenta varios parámetros:

- Cantidad de agua vertida para poder ligar el material refractario no sea agua de mar, ni que contenga azúcares, ni que contengan mas de 100 ppm de impurezas ($\text{SO}_4=$, MgCl_2 , etc) ni que su pH sea menor de 5.
- La cantidad de agua o ligante vertido para hacer la mezcla se ha de echar poco a poco y el tiempo de mezcla no debe ser superior a los 3 minutos.
- Se ha de tener en cuenta el tiempo de vertido que va unido al tiempo de fraguado del material.

- Se tiene que tener en cuenta si la zona donde se va a proceder a colar y verter el material precisa de algún tipo de encofrado o molde, ya bien sea metálico o de madera.
- El fraguado del material y posterior curado ha de ser como mínimo de 24 horas, teniendo en cuenta siempre el espesor de material.



1.1.3.2 Colado – Vibrado

Estos tipos de materiales son aquellos que necesitan de una fuerza externa para dotarles de una fluidez. Generalmente son materiales refractarios denominados defloculados o tixotrópicos (contienen dispersantes). Lo que conlleva a que la mezcla de estos materiales sea un poco más cuidadosa que en los mencionados anteriormente puesto que el paso de seco a consistente puede ser de repente.

Lo que se consigue con estos tipo de materiales refractarios es una mayor compactación, menor porosidad y como consecuencia una mayor resistencia mecánica.

Además de todos los parámetros anteriores, es muy de tener en cuenta:

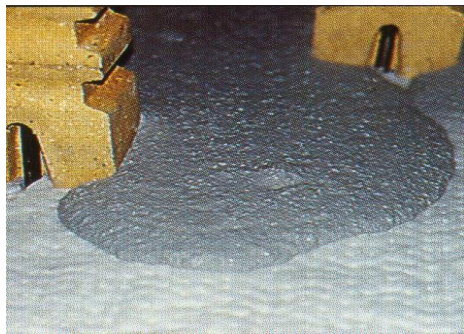
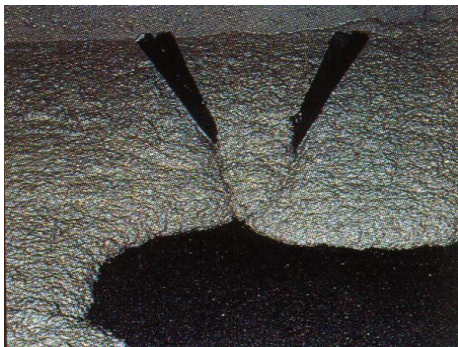
- Las características de vibración: el tipo de frecuencia, posición, tipo de porra vibradora que se ha de utilizar, etc.
- El tiempo de vibración: donde se tiene que tener en cuenta el moldeo la compactación, segregación, etc.



1.1.3.3 Autocolado

Estos tipos de materiales son hormigones defloculados, los cuales no necesitan de nada para distribuirse por el molde y coger el nivel requerido. Es un material que se puede bombear.

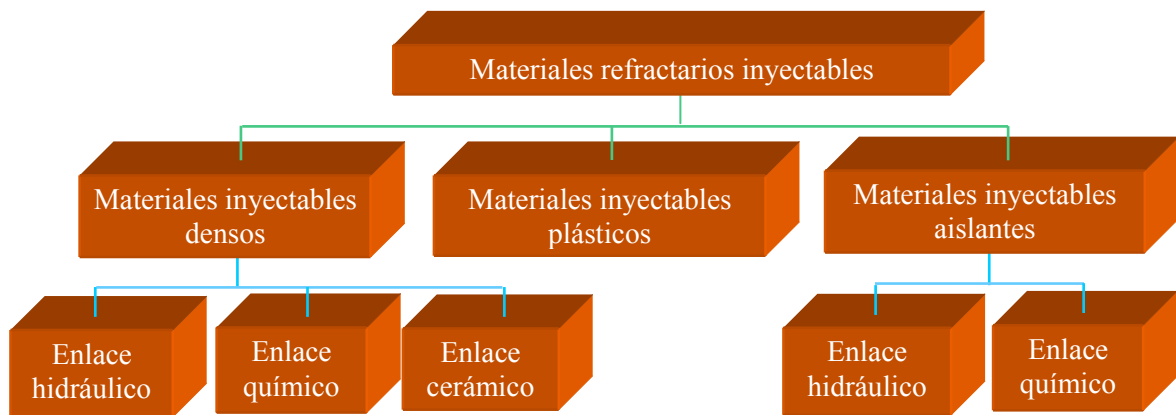
- Los parámetros a tener en cuenta son parecidos a los colados vibrados haciendo un especial hincapié en la cantidad de agua que le vertemos y el tiempo que lo tenemos haciendo la mezcla.



1.1.3.4 Gunitables

Los hormigones gunitables tanto densos como aislantes (materiales refractarios) son hormigones que se utilizan para reparaciones o parcheos no obstante también se usan para cubrir grandes superficies.

Siguen la siguiente clasificación



Esta clasificación abarca tanto el gunitado, shotcreting y enfoscado, que dependiendo de la zona o del tipo de material que se quiera inyectar se usa uno u otro método.

Estos materiales siguen una serie de parámetros que han de tenerse en cuenta a la hora de su aplicación:

- Distancia tanto vertical como horizontal de la zona en la que se va a aplicar el revestimiento.
- Superficie que se va a reparar, si es pared, bóveda, etc.
- Tipo de equipo que se va a utilizar para aplicar el material, boquillas, pistola, diámetro de manguera, potencia de bomba, etc.
- Caudal del material que se va a proyectar
- Adición de agua necesaria
- Tipo de operación, si va a ser un trabajo continuo o discontinuo.
- Se ha de tener en cuenta el rebote del material (entre un 20% y un 30% de material de rebote)

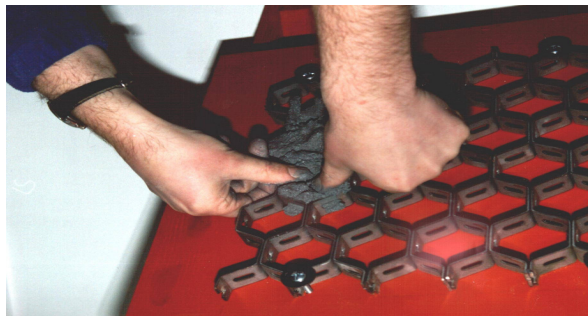


1.1.3.5 Apisonados

Estos tipos de materiales vienen normalmente en pastillas o bloques para su posterior instalación.

Siguen una serie de parámetros los cuales se tienen que seguir para su instalación sea la adecuada:

- No han de tener contacto con el agua.
- Se han de impermeabilizar si sobre ellos se instala hormigón
- La superficie ha de ser raspada o debe ser rugosa para absorber las contracciones.



Muchas veces estas masas plásticas se aplican por la técnica del gunitado.

1.1.3.6 Vertidos en seco

En estos tipos de materiales se suprime la utilización de agua, lo cual es una ventaja, pero su instalación se complica puesto que genera H₂.

Se debe tener en cuenta:

- La superficie a de estar bien acondicionada y limpia
- Cuando se vierta el material hay que darle una pequeña compactación
- Se le ha de dar un tratamiento térmico para que el material endurezca
- Se traslada a la zona de colada

1.1.4 De acuerdo con su composición química

1.1.4.1 Refractarios sílico-aluminosos

- Refractarios silíceos
- Refractarios sílico-aluminosos
- Refractarios de alúmina

1.1.4.2 Refractarios especiales

- Refractarios con espinela
- Refractarios con cromo: cromo, cromita
- Refractarios con carburo de silicio
- Refractarios de circón

1.1.4.3 Refractarios básicos

- Refractarios básicos de magnesia / magnesita
- Refractarios de magnesia-cromo

1.1.4.4 Refractarios con contenido en carbono

| | |
|-----------|--|
| Clase I | Materiales con $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 45 \%$ |
| Clase II | $10 \% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 < 45 \%$ |
| Clase III | Materiales con: $\text{SiO}_2 \geq 85 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 10 \%$ |
| Clase IV | Materiales básicos: magnesia, cromita, espinela, forsterita, dolomía, ... y mezclas de ellos |
| Clase V | Materiales especiales: carbono, carburos, nitruros, circón, circonia, ... y mezcla de éstos |
| Clase VI | Mezcla de materiales. Mezcla de I a V y constituyente principal de clase I a IV |
| Clase VII | Mezcla especial de materiales. Mezcla de I a V y constituyente principal de clase V, excepto clase V |

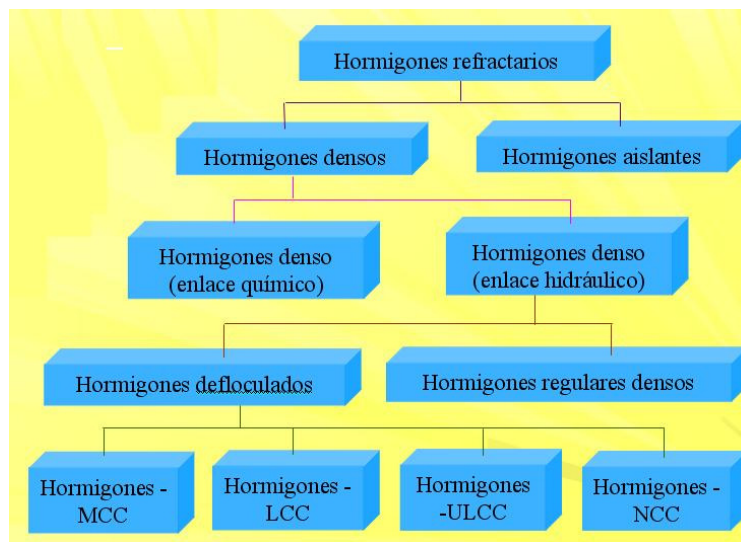
1.1.5 De acuerdo con el tipo de enlace (ligante)

- 1.1.5.1 Hidráulico: cemento, endurecimiento a temperatura ambiente.
- 1.1.5.2 Cerámico: endurecimiento por sinterización durante la cocción
- 1.1.5.3 Químico (inorgánico u orgánico): endurecimiento por reacción química a temperatura ambiente o inferior a la sinterización
- 1.1.5.4 Orgánico: unión o endurecimiento a temperatura ambiente o superior.

Se puede llegar a dar el caso de coexistencia de varios enlaces. Ej. masa semiplástica de enlace fosfático

1.1.6 Basado en la densidad

| | |
|--|---------------------------------|
| <i>Hormigón de contenido medio en cemento (MCC):</i> | $>2,5 \% \text{ CaO}$ |
| <i>Hormigón de contenido bajo en cemento (LCC):</i> | $> 1\% \leq 2,5 \% \text{ CaO}$ |
| <i>Hormigón de contenido ultra-bajo en cemento (ULCC):</i> | $> 0,2\% \leq 1 \% \text{ CaO}$ |
| <i>Hormigón sin cemento (NCC):</i> | $\leq 0,2 \% \text{ CaO}$ |



1.1.7 Otros

De acuerdo con normas:

ASTM C-401, ASTM C-673, JIS R2561, PRE R-43, R-4

2. Introducción al Hierro y al Acero

El Hierro, es un elemento metálico, magnético, maleable y de color blanco plateado. Tiene de número atómico 26 y es uno de los elementos de transición del sistema periódico. También, es uno de los elementos metálicos más abundantes en el planeta. Constituye aproximadamente el 4.5% de la corteza terrestre. Existen pequeñas cantidades de hierro combinadas con aguas naturales, en las plantas, y además es un componente de la sangre. El hierro puro tiene una dureza que oscila entre 4 y 5. Es blando, maleable y dúctil. Se magnetiza fácilmente a temperatura ordinaria, y es difícil magnetizarlo en caliente. A unos 790 °C desaparecen las propiedades magnéticas. El punto de fusión del hierro, es de unos 1.535 °C, un punto de ebullición de 2.750 °C. La densidad relativa de este metal es de 7,86. Su masa atómica es 55,847. Las impurezas más corrientes del mineral de hierro son con sílice, titanio y fósforo.

El hierro generalmente es encontrado en forma de óxido de magnetita, hematita, limonita, u óxidos hidratados. Se extrae del mineral por medio de los hornos altos tal como puede volverse a fundir y colar para darle cualquier forma, o bien refinarse para transformarlo en acero o hierro forjado. Hoy en día los hornos pueden producir entre 500 y 1200 toneladas de hierro por día. El mineral se reduce a metal en el horno alto por medio del coque cargado en el mineral y las impurezas se escorifican mediante la castina cargada también con el mineral. El aire inyectado a través del horno, se calienta previamente en estufas que constituyen una parte importante de la instalación del horno alto. La combustión del coque suministra el calor necesario, y el óxido de carbono formado por la combustión parcial del coque, junto con el coque, producen el hierro. El hierro líquido y la escoria se depositan en el fondo del horno, de donde se sacan periódicamente por medio de sangrados. El mineral, coque y castina se elevan desde el nivel del suelo al tragante del horno mediante dos vagonetas que se mueven sobre planos inclinados. Los materiales se pesan cuidadosamente con el fin de que se carguen en proporciones correctas, las cuales varían según sea el horno y la calidad de mineral usado. Las vagonetas descargan su contenido en el tragante y cae sobre la campana inferior al bajar la campana superior; de esta forma, al bajar la campana inferior entra dentro del horno el empleo de estas dos campanas impide que los gases llamas salgan al exterior por el tragante del horno cada vez que se carga. El aire caliente se inyecta

por las toberas, cerca del fondo del horno. Los gases producidos se sacan a nivel próximo al tragante y a continuación se hacen pasar por el separador de polvo y por un lavador. Estos gases contienen nitrógeno, anhídrido carbónico y óxido de carbono. El óxido de carbono es combustible y puede quemarse para producir energía o calor. Aproximadamente un tercio de estos gases se emplea para calentar los recuperadores los cuales a su vez calientan el aire inyectado en el horno alto. Al quemarse los gases calientan los ladrillos y una vez calientes se suspende la circulación de los gases y en su lugar se hace pasar el aire que se ha de inyectar en el horno. A medida que se forma el hierro y la escoria van cayendo en el crisol situado en el fondo del horno debido a que el hierro es más denso que la escoria, se deposita en el fondo, mientras que la escoria flota sobre el hierro fundido. Cerca del fondo del horno existen dos orificios. El más bajo, o piquera, sirve para sangrar el hierro y se tapa con bolas de arcilla disparadas mediante aire comprimido. El orificio superior o bigotera sirve para sacar la escoria y se cierra por medio de un tapón metálico. El hierro se sangra cada cuatro o cinco horas quitando el tapón de arcilla; la escoria se saca dos o tres veces entre cada dos sangrados de hierro. Muchas de las impurezas del mineral son recogidas y evacuadas con la castina fundida formando la escoria. El hierro que sale del horno alto se conduce por canales a la cuchara, sobre dichos canales se coloca un espumador para separar la escoria y el verterla en una vagoneta. El hierro vertido en la cuchara se calienta a continuación en lingoteras, o bien se transporta en estado líquido a los hornos para fabricar acero. Algunas veces las escorias son apropiadas para la fabricación de cemento, pero la mayoría de los casos se descargan en los escoriales. El hierro tal como sale del horno tiene de 3 a 4% de carbono y cantidades variable de silicio, azufre, fósforo y manganeso. Las cantidades de silicio y azufre se regulan entre ciertos límites con la conducción del horno pero el contenido de fósforo depende exclusivamente de las materias empleadas. El azufre y fósforo son dos de las impurezas más perjudiciales, y como quiera que la eliminación del azufre resulte difícil, excepto si se emplean tratamientos eléctricos especiales, es importante producir hierro con bajo porcentaje de azufre.

Se introducen en el alto horno los materiales necesarios tales como el mineral de hierro, el carbón de coque que hace de combustible y también se introduce la piedra caliza que realiza la función de acelerar la fundición del hierro y su fusión con el carbono. Del alto horno salen dos productos uno llamado escoria que son los

residuos del propio alto horno y otro es el producto deseado que se llama arrabio pero el arrabio es un acero con alto contenido en carbono por eso se transporta cuando sale del alto horno en vagonetas llamadas torpedos hasta el convertidor donde este arrabio y se le baja el contenido de carbono mediante ferroaleaciones, fundentes o chatarra; estos tres productos pueden ir directamente al convertidor para ayudar en la obtención del acero o también puede ser convertidos en acero en un horno eléctrico y pasar directamente al paso posterior al convertidor que es el transportado en cucharas hasta los tres tipos de colada que son:

A COLADA CONTINUA: Se produce cuando el acero liquido se vierte sobre un molde de fondo desplazable cuya sección tiene la forma que nosotros deseamos que tenga el producto final " cuadrados, redondos, triangulares, planchas..." se le llama colada continua porque el producto sale sin parar hasta que se acaba el contenido de la cuchara, por lo tanto con este método se ahorra mucho dinero ya que no se necesita moldes, se consume menos energía, etc.

A COLADA DE LINGOTES: El acero se vierte sobre unas lingoteras o moldes que tienen una forma determinada y que al enfriarse y solidificarse dan un producto deseado para su transformación.

A COLADA CONVENCIONAL: El acero se vierte sobre unos moldes que tienen la forma del producto final y que cuando se enfría tiene la forma del mismo de las tres coladas vistas es la única que no necesita una transformación posterior al proceso.

Desde el punto de vista químico-metalúrgico, todos los procesos de fabricación de acero se pueden clasificar en ácidos y básicos (según el refractario y composición de la escoria utilizada), y cada proceso tiene funciones específicas según el tipo de afino que puede efectuar. Los procesos ácidos utilizan refractarios de sílice y por las condiciones de trabajo del proceso hay que poder formar escorias que se saturen de sílice. Los procesos ácidos pueden utilizarse para eliminar carbono, manganeso y silicio; no son aptos para disminuir el contenido en fósforo y azufre, y por esto requieren el consumo de primeras materias seleccionadas, cuyo contenido en fósforo y azufre cumple las especificaciones del acero final que se desea obtener. Los procesos básicos utilizan refractarios de

magnesita y dolomita en las partes del horno que están en contacto con la escoria fundida y el metal. La escoria que se forma es de bajo contenido de sílice compensada con la cantidad necesaria de cal. El proceso básico elimina, de manera tan eficaz como el proceso ácido, el carbono, manganeso y silicio, pero además eliminan el fósforo y apreciables contenidos de azufre. De aquí las grandes ventajas del proceso básico, por su gran flexibilidad para consumir diversas materias primas que contengan fósforo y azufre y por los tipos y calidades de acero que con él se pueden obtener.

2.1 Proceso de fabricación del Hierro

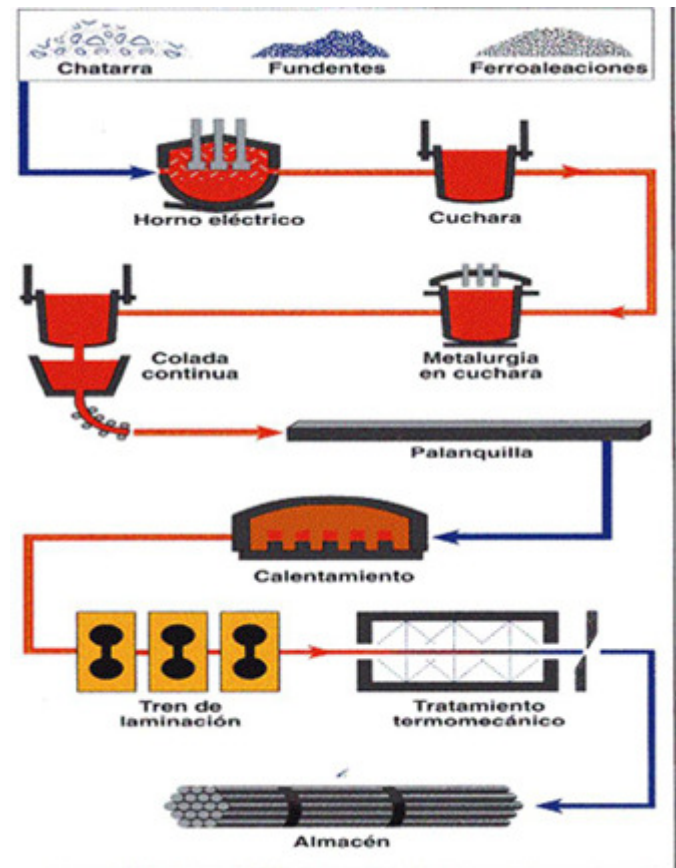
2.1.1 Introducción

El hierro en estado puro no posee la resistencia y dureza necesarias para las aplicaciones de uso común. Sin embargo, cuando se combina con pequeñas cantidades de carbono se obtiene un metal denominado acero, cuyas propiedades varían en función de su contenido en carbono y de otros elementos en aleación, tales como el manganeso, el cromo, el silicio o el aluminio, entre otros.

El acero se puede obtener a partir de dos materias primas fundamentales:

- El arrabio, obtenido a partir de mineral en instalaciones dotadas de horno alto (proceso integral);
- Las chatarras férricas, que condicionan el proceso de fabricación.

En líneas generales, para fabricar acero a partir de arrabio se utiliza el convertidor con oxígeno, mientras que partiendo de chatarra como única materia prima se utiliza exclusivamente el horno eléctrico (proceso electro siderúrgico).



2.1.2 La chatarra.

Tras el proceso de reconversión industrial de la siderurgia en España se abandona la vía del horno alto y se apuesta de forma decidida por la obtención de acero a través de horno eléctrico.

En este proceso, la materia prima es la chatarra, a la que se le presta una especial atención, con el fin de obtener un elevado grado de calidad de la misma. Para ello, la chatarra es sometida a unos severos controles e inspecciones por parte del fabricante de acero, tanto en su lugar de origen como en el momento de la recepción del material en fábrica.

La calidad de la chatarra depende de tres factores:

- de su facilidad para ser cargada en el horno;
- de su comportamiento de fusión (densidad de la chatarra, tamaño, espesor, forma, etc.);

- de su composición, siendo fundamental la presencia de elementos residuales que sean difíciles de eliminar en el proceso del horno.



Atendiendo a su procedencia, la chatarra se puede clasificar en tres grandes grupos

- Chatarra reciclada: formada por despuntes, rechazos, etc. originados en la propia fábrica. Se trata de una chatarra de excelente calidad.
- Chatarra de transformación: producida durante la fabricación de piezas y componentes de acero (virutas de máquinas herramientas, recortes de prensas y guillotinas, etc.).
- Chatarra de recuperación: suele ser la mayor parte de la chatarra que se emplea en la acería y procede del desguace de edificios con estructura de acero, plantas industriales, barcos, automóviles, electrodomésticos, etc.



Los controles a los que se somete la chatarra se producen en tres niveles:

- Inspección en origen por parte de personal especializado.
- Inspección visual en el momento de la descarga en puerto para material importado.
- Control de recepción en fábrica de forma exhaustiva por unidad de transporte, con independencia de la procedencia del material (nacional o importado), con el fin de eliminar todo elemento nocivo, materias explosivas o inflamables, material radiactivo, así como de todos aquellos metales no férreos, tierras, cuerpos extraños, etc.



2.2 Principios básicos para la obtención del acero

La obtención del acero pasa por la eliminación de las impurezas que se encuentran en el arrabio o en las chatarras, y por el control, dentro de unos límites especificados según el tipo de acero, de los contenidos de los elementos que influyen en sus propiedades.

Las reacciones químicas que se producen durante el proceso de fabricación del acero requieren temperaturas superiores a los 1000 °C para poder eliminar las sustancias perjudiciales, bien en forma gaseosa o bien trasladándolas del baño a la escoria.

Principales reacciones químicas en el afino

| Elemento | Forma de eliminación | Reacción química |
|-----------|---|--|
| Carbono | Al combinarse con el oxígeno se quema dando lugar a CO y CO_2 gaseoso que se elimina a través de los humos. | $2 \text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}$ $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$ |
| Manganeso | Se oxida y pasa a la escoria. Combinado con sílice da lugar a silicatos. | $2 \text{Mn} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{MnO}$ $\text{MnO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{silicatos}$ |
| Silicio | Se oxida y pasa a la escoria. Forma silicatos | $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$ $\text{SiO}_2 + \text{óxidos} \rightarrow \text{silicatos}$ |
| Fósforo | En una primera fase se oxida y pasa a la escoria. En presencia de carbono y altas temperaturas puede revertir al baño. Para fijarlo a la escoria se añade cal formándose fosfato de calcio. | $4 \text{P} + 5 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{P}_2\text{O}_5$ $\text{P}_2\text{O}_5 + 5 \text{C} \rightarrow 2 \text{P} + 5 \text{CO}$ $2 \text{P} + 5 \text{FeO} + 3 \text{CaO} \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 3 \text{CaO} + 5 \text{Fe}$ |
| Azufre | Su eliminación debe realizarse mediante el aporte de cal, pasando a la escoria en forma de sulfuro de calcio. La presencia de manganeso favorece la desulfuración. | $\text{S} + \text{Fe} + \text{CaO} \rightarrow \text{FeO} + \text{SCa}$ $\text{S} + \text{Fe} + \text{MnO} \rightarrow \text{SMn} + \text{FeO}$ $\text{S} + \text{Fe} + \text{Mn} \rightarrow \text{SMn} + \text{Fe}$ |

2.2.1 Fabricación del acero

El proceso de fabricación se divide básicamente en dos fases: la fase de fusión y la fase de afino.

- Fase de fusión.

Una vez introducida la chatarra en el horno y los agentes reactivos y escorificantes (principalmente cal) se desplaza la bóveda hasta cerrar el horno y se bajan los electrodos hasta la distancia apropiada, haciéndose saltar el arco hasta fundir completamente los materiales cargados. El proceso se repite hasta completar la capacidad del horno, constituyendo este acero una colada.



- Fase de afino

El afino se lleva a cabo en dos etapas. La primera en el propio horno y la segunda en un horno cuchara.

En el primer afino se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de impurezas y elementos indeseables (silicio, manganeso, fósforo, etc.) y realizar un primer ajuste de la composición química por medio de la adición de ferroaleaciones que contienen los elementos necesarios (cromo, níquel, molibdeno, vanadio, titanio, etc.).

El acero obtenido se vacía en una cuchara de colada, revestida de material refractario, que hace la función de cuba de un segundo horno de afino en el que termina de ajustarse la composición del acero y de dársele la temperatura adecuada para la siguiente fase en el proceso de fabricación.

Para obtener un acero de calidad el proceso debe controlarse en todas sus fases empezando, como ya se ha comentado, por un

estricto control de las materias primas cargadas en el horno.

Durante el proceso se toman varias muestras del baño y de las escorias para comprobar la marcha del afino y poder ir ajustando la composición del acero. Para ello se utilizan técnicas instrumentales de análisis (espectrómetros) que permiten obtener resultados en un corto espacio de tiempo, haciendo posible un control a tiempo real y la adopción de las correcciones precisas de forma casi instantánea, lográndose así la composición química deseada.

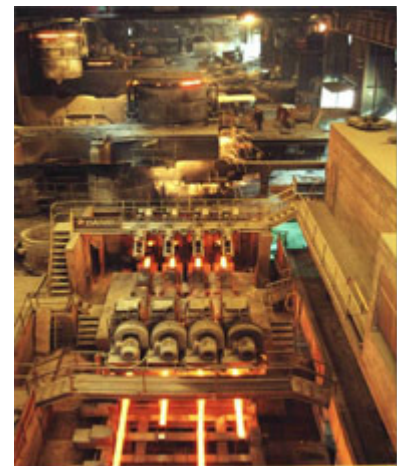
Los dos elementos que más pueden influir en las características y propiedades del acero obtenido, el carbono y el azufre, se controlan de forma adicional mediante un aparato de combustión LECO. Pero además de la composición del baño y de la escoria, se controla de forma rigurosa la temperatura del baño, pues es la que determina las condiciones y la velocidad a la que se producen las distintas reacciones químicas durante el afino.

Finalizado el afino la cuchara de colada se lleva hasta la artesa receptora de la colada continua donde vacía su contenido en una artesa receptora dispuesta al efecto.

2.2.2 La colada continua:

Es un procedimiento siderúrgico en el que el acero se vierte directamente en un molde de fondo desplazable, cuya sección transversal tiene la forma geométrica del semiproducto que se desea fabricar; en nuestro caso la palanquilla.

La artesa receptora tiene un orificio de fondo, o buza, por el que distribuye el acero líquido en varias líneas de colada, cada una de las cuales disponen de su lingotera o molde, generalmente de cobre y paredes huecas para permitir su refrigeración con agua, que sirve para dar forma al producto. Durante el proceso la lingotera se mueve alternativamente hacia arriba y hacia abajo, con el fin de despegar la costra sólida que se va formando durante el enfriamiento.



Posteriormente se aplica un sistema de enfriamiento controlado por medio de duchas de agua fría primero, y al aire después cortándose el semiproducto en las longitudes deseadas mediante sopletes que se desplazan durante el corte.

En todo momento el semiproducto se encuentra en movimiento continuo gracias a los rodillos de arrastre dispuestos a lo largo de todo el sistema.

Finalmente, se identifican todas las palanquillas con el número de referencia de la colada a la que pertenecen, como parte del sistema implantado para determinar la trazabilidad del producto, vigilándose la cuadratura de su sección, la sanidad interna, la ausencia de defectos externos y la longitud obtenida.

2.2.3 El horno de recalentamiento

El proceso comienza elevando la temperatura de las palanquillas hasta un valor óptimo para ser introducidas en el tren de laminación. Generalmente estos hornos son de gas y en ellos se distinguen tres zonas: de precalentamiento, de calentamiento y de homogeneización. El paso de las palanquillas de una zona a otra se realiza por medio de distintos dispositivos de avance. La atmósfera en el interior del horno es oxidante, con el fin de reducir al máximo la formación de cascarilla.

2.2.4 El tren de laminación

Alcanzada la temperatura deseada en toda la masa de la palanquilla, ésta es conducida a través de un camino de rodillos hasta el tren de laminación.



El tren de laminación está formado, como se ha indicado, por parejas de cilindros que van reduciendo la sección de la palanquilla. Primero de la forma cuadrada a forma de óvalo, y después de forma de óvalo a forma redonda. A medida que disminuye la sección, aumenta la longitud del producto transformado y, por tanto, la velocidad de laminación. El tren se controla de forma automática, de forma que la velocidad de las distintas cajas que lo componen va

aumentando en la misma proporción en la que se redujo la sección en la anterior.

El tren de laminación se divide en tres partes:



Tren de desbaste: donde la palanquilla sufre una primera pasada muy ligera para romper y eliminar la posible capa de cascarilla formada durante su permanencia en el horno.

Tren intermedio: formado por distintas cajas en las que se va conformando por medio de sucesivas pasadas la sección.

Tren acabador: donde el producto experimenta su última pasada y obtiene su geometría de corrugado.

Las barras ya laminadas se depositan en una gran placa o lecho de enfriamiento, de donde es trasladado a las líneas de corte a medida y empaquetado, de donde pasa a la zona de almacenamiento y expedición.

En el caso de la laminación de rollos, éstos salen del tren acabador en forma de espira, siendo transportados por una cinta enfriadora, desde la que van siendo depositadas en un huso, donde se compacta y se ata para su expedición, o bien se lleva a una zona de encarretado, donde se forman bobinas en carrete.

Durante la laminación se controlan los distintos parámetros que determinarán la calidad del producto final: la temperatura inicial de las palanquillas, el grado de deformación de cada pasada —para evitar que una deformación excesiva de lugar a roturas o agrietamientos del material—, así como el grado de reducción final, que define el grado de forja,

Del producto final se toman las muestras necesarias para ser sometidas a los ensayos de caracterización mecánica (tracción, doblado-desdoblado, fatiga y carga cíclica) y geométrica que les son de aplicación en función de las especificaciones establecidas por la norma conforme a la que ha sido fabricado.



En todo momento se conserva la trazabilidad del sistema, puesto que el material en rollo o en barra obtenido queda siempre identificado con la colada de la que procede, y el momento de su laminación.

2.3 Laminación como proceso de obtención del acero

Podemos definir la laminación como el proceso de manufactura mediante el cual se transforma el acero haciéndolo pasar entre dos rodillos o cilindros, que giran a la misma velocidad y en sentidos contrarios de una forma y longitud inicial a una forma final más pequeña y longitud mayor definida por el trazado del producto que se quiera fabricar. Es por esto que la calidad del producto dependerá mucho de la calidad del acero que se utilice. Este proceso aprovecha la ductilidad del acero, es decir, su capacidad de deformarse, tanto mayor cuanto mayor es su temperatura, por lo tanto se puede realizar en frío o en caliente

2.3.1 Laminación en Frío

El molino de laminación en frío, reduce el espesor de la lámina, a la vez que le dan propiedades de resistencia, dureza y modifican la microestructura del acero. El proceso cuenta con funciones automáticas que incluyen la regulación de la velocidad además de un control de espesores, lo que permite una gran

precisión en toda la gama de calibres. La lámina puede pasar a un proceso de lavado electrolítico, que consiste en eliminar cualquier remanente de aceite soluble en la lámina, o bien directamente a los hornos de recocido. En el proceso de recocido se restablecen tanto las propiedades de maleabilidad como de troquelabilidad de la lámina modificados por la reducción en frío. Para asegurar una óptima calidad, se cuenta con atmósfera base 100% hidrógeno que garantiza limpieza superficial y mejor control de propiedades mecánicas. El proceso de templado le da a la lámina las propiedades metalúrgicas de dureza, resistencia y control de rugosidad superficial. Por último, en el proceso de tensión nivelado se inspeccionan y mejoran las características de forma y planeza que se crean en el proceso de laminación, teniendo como resultado un producto extraplano y sin defecto. Los principales usos de la lámina rolada en frío son:

- Partes expuestas y no expuestas para artículos de línea blanca.
- Aplicaciones en maquinaria y equipo.
- Perfiles y tubería.
- Tambores y envases.
- Insumo para procesos de galvanizado.
- Laminación de motor.

2.3.2 Laminación en Caliente

En este proceso, el lingote colado se calienta al rojo vivo en un horno denominado foso de termodifusión, donde básicamente las palanquillas o tochos, se elevan a una temperatura entre los 900 °C y los 1.200°C. Estas se calientan con el fin de proporcionar ductilidad y maleabilidad para que sea más fácil la reducción de área a la cual va a ser sometido.

Durante el proceso de calentamiento de las palanquillas se debe tener en cuenta:

- Una temperatura alta de calentamiento del acero puede originar un crecimiento excesivo de los granos y un defecto llamado “quemado” del acero que origina grietas que no son eliminables.
- Una temperatura baja de calentamiento origina la disminución de la plasticidad del acero, eleva la resistencia de deformación y puede originar grietas durante la laminación.

Por tanto la temperatura óptima de trabajo no es un solo valor, sino que varía en cierto rango de temperatura entre un límite superior y un límite inferior. A continuación del proceso de calentamiento se hace pasar los lingotes entre una serie de rodillos metálicos colocados en pares que lo aplastan hasta darle la forma y tamaño deseados. La distancia entre los rodillos va disminuyendo a medida que se reduce el espesor del acero. El primer par de rodillos por el que pasa el lingote se conoce como tren de desbaste o de eliminación de asperezas. Después del tren de desbaste, el acero pasa a trenes de laminado en bruto y a los trenes de acabado que lo reducen a láminas con la sección transversal correcta. Los trenes o rodillos de laminado continuo producen tiras y láminas con anchuras de hasta 2,5 m. Estos laminadores procesan con rapidez la chapa de acero antes de que se enfríe y no pueda ser trabajada. Las planchas de acero caliente de más de 10 cm. de espesor se pasan por una serie de cilindros que reducen progresivamente su espesor hasta unos 0,1 cm. y aumentan su longitud de 4 a 370 m. Los trenes de laminado continuo están equipados con una serie de accesorios como rodillos de borde, aparatos de decapado o eliminación y dispositivos para enrollar de modo automático la chapa cuando llega al final del tren. Los rodillos de borde son grupos de rodillos verticales situados a ambos lados de la lámina para mantener su anchura. Los aparatos de decapado eliminan la costra que se forma en la superficie de la lámina apartándola mecánicamente, retirándola mediante un chorro de aire o doblando de forma abrupta la chapa en algún punto del recorrido. Las bobinas de chapa terminadas se colocan sobre una cinta transportadora y se llevan a otro lugar para ser recocidas y cortadas en chapas individuales. A demás de las chapas de acero también se pueden producir perfiles con formas (en H, en T o en L) esto se hace por medio de rodillos que tienen estrías que proporcionar la forma adecuada. Todo este proceso es completamente automatizado, lo que garantiza la consistencia en el producto final, tanto en las propiedades metalúrgicas como en la calidad superficial, con un control de calibre y ancho muy superior a las normas establecidas.

Sus principales aplicaciones son:

- Troquelados profundos y extraprofundos.

- Tubería para diversos usos de alta y mediana resistencia.
- Industria Automotriz para partes no expuestas.
- Aplicaciones en maquinaria y equipo.
- Flejes de alta resistencia.
- Uso Industrial para piezas con embutido severo.

3. Hornos de tratamiento Térmico para el acero

Se pueden mencionar:

3.1 Alto horno

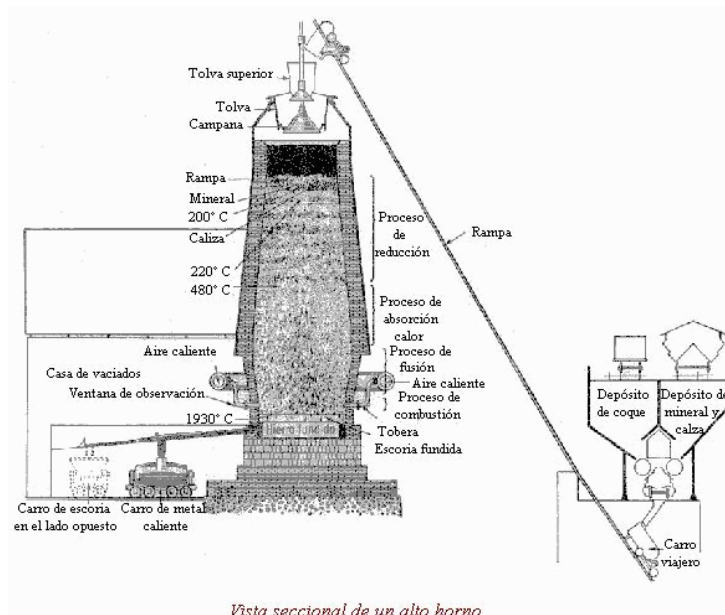
El alto horno es un horno vertical en el que se produce arrabio a partir de mineral de hierro y otras materias primas. Estas se cargan por la garganta al principio del horno o por la tolva superior.

A medida el arrabio va descendiendo se reduce a altas temperaturas que se van evacuando por la parte inferior por la piqueta.

En la parte superior del horno está la chimenea, a la que están conectadas varias tomas, de la parte baja a la parte alta. También hay una serie de toberas uniformemente espaciadas alrededor de la chimenea. A través de las toberas se inyecta aire caliente, fuel oil y carbón pulverizado en el horno.

El aire caliente se desplaza desde la parte superior de alto horno a través de la línea de tiro de aire caliente a la tubería principal que rodea el proceso de combustión que se da en el alto horno. De allí, van de golpe a las toberas a través de los tubos, donde las escorias y el arrabio fundido pasan a través de la parte superior e inferior de piqueras en el hogar.

Después de pasar por distintos canales, la escoria es recogida por unos cucharones, mientras que el arrabio fundido se deposita en la cuchara torpedo.



3.2 Estufa de un alto horno

La estufa de un alto horno calienta el aire a una temperatura de 1200-1300 °C.

La estufa se compone de una cámara de combustión construida de ladrillos. El gas caliente producido en la cámara de combustión pasa a la cámara.

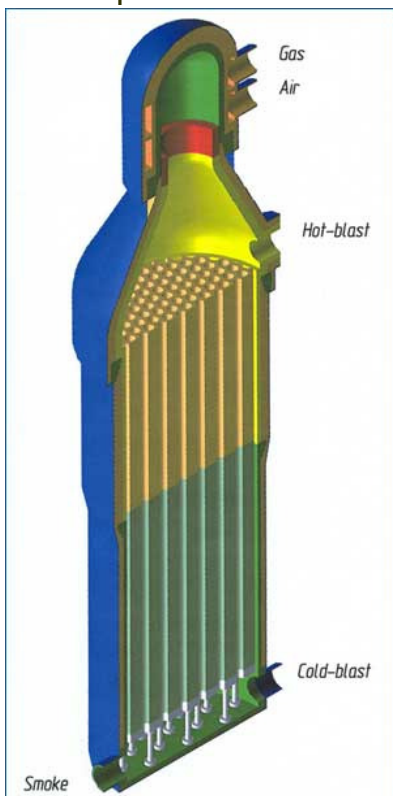
La estufa de alto horno es un intercambiador de calor, donde el aire entra a la cámara en dirección opuesta, de modo que el intercambio de calor resultante produce una ráfaga de aire caliente.

El alto horno debe estar equipado con al menos dos estufas y, de hecho, por lo general tienen tres o cuatro. Las estufas funcionan en turnos, de manera que cuando en uno se entrega el chorro de aire caliente en otro se produce la combustión.

En general, en la construcción de una estufa de alto horno, los refractarios monolíticos son gunitados en la carcasa de la estufa y la parte interna es revestida con ladrillos refractarios.

El aire calentado que se calienta en la estufa se sopla en el horno bajo a altas presiones, por ello que el revestimiento está expuesto a una tensión considerable.

Los refractarios gunitados en la carcasa de la estufa crean un muro sin juntas, impidiendo que el aire caliente llegue a estar en contacto con la parte metálica.



3.3 Cuchara de transporte de metal caliente (Torpedo)

El carro de transferencia de metal caliente cuchara o cuchara torpedo es un recipiente revestido con refractario para la recepción de arrabio fundido del alto horno y su transferencia de la planta de de acero (acería).

Debido a que sólo tiene una pequeña abertura, no hay prácticamente pérdida de calor y como consecuencia poca disminución en la temperatura del arrabio fundido.

Está compuesto por el recipiente que contiene el hierro fundido y un carro en que se apoya. El contenedor es simétrico, consta de un cilindro horizontal, cónico en ambos extremos, popularmente llamada de torpedos debido a su forma.

El hierro fundido se recibe y se vierte a través de un cañón en la parte superior central. El carro está equipado con un aparato que gira el recipiente para que la apertura pueda inclinarse hacia abajo.

El revestimiento refractario de estos tipos de equipos depende de la zona e influyen aspecto como la gravedad, el estrés al recibir el arrabio fundido y la escoria.

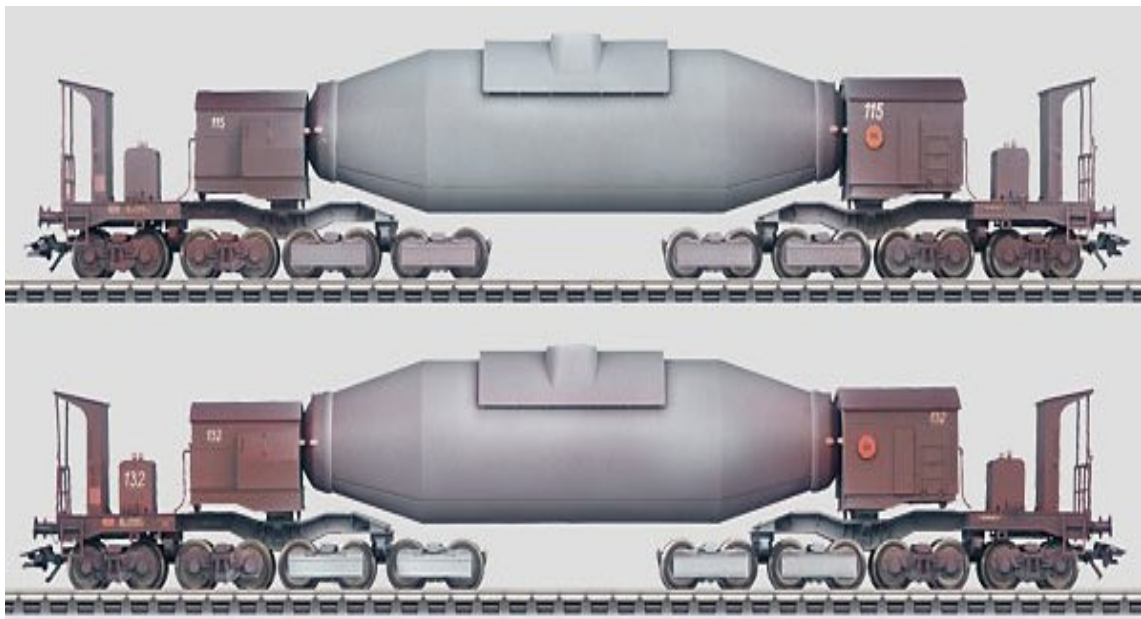
Es común el uso de refractarios monolíticos de alta alúmina alrededor de la boquilla. El revestimiento monolítico previene problemas que ocurren con ladrillos refractarios, tales como grietas, debido a la expansión y contracción térmica de los ladrillos durante el movimiento basculante. La parte inferior de la cuchara, altamente susceptibles al desgaste debido al impacto del hierro fundido, se construye con un revestimiento grueso refractario, generalmente ladrillos refractarios de alta resistencia. Las partes cilíndricas o cónicas del cilindro, incluyendo la línea de escoria, están revestidos con ladrillos refractarios o con refractarios monolíticos con alta resistencia mecánica, que eviten la penetración del hierro fundido.

El desgaste mecánico es causado por el impacto durante la recepción del hierro fundido, por el movimiento del arrabio durante el soplado, por la introducción de agentes para desilanzación, defosforización y desulfuración, por la vibración durante el transporte y por el lavado que el arrabio fundido ejerce sobre el material refractario durante la inclinación para transferir el hierro a otra cuchara.

De esta manera el revestimiento refractario de la cuchara torpedo está expuesto a unas duras condiciones y el grado de desgaste muy fuerte.

Es conveniente realizar reparaciones para prolongar la vida de servicio durante el período de funcionamiento. Son reparaciones intermedias que se realizan en las zonas desgastadas o dañadas de ladrillo refractario con llana o mediante la técnica de gunitado.

Es por ello que los refractarios monolíticos desempeñan un papel muy importante en la reparación de estas cucharas.



3.4 Cucharas de acero y equipos de tratamiento térmico.

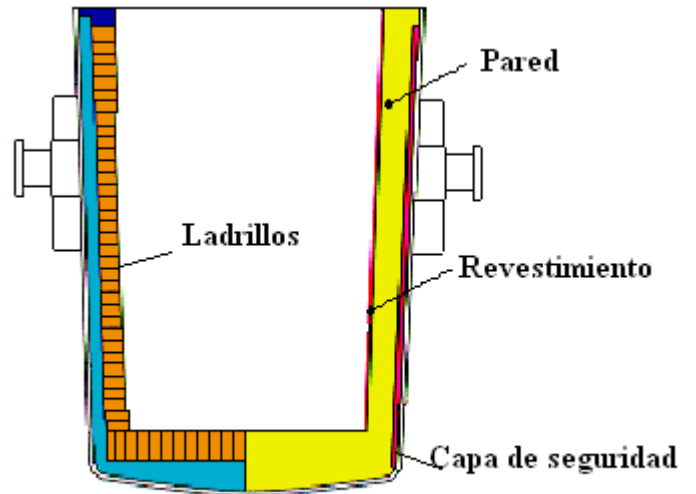
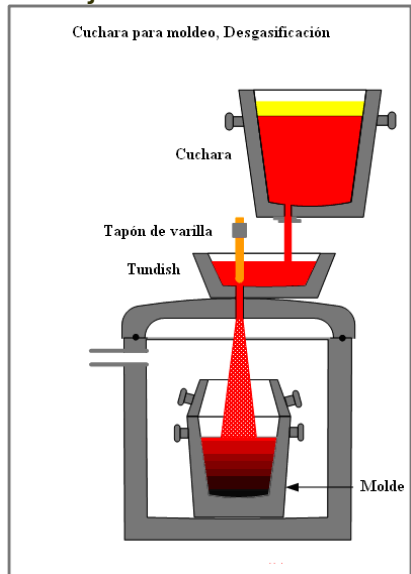
Algunos ejemplos pueden ser: la cuchara, la cuchara rebosante, convertidor, cuchara de acero fundido

Cada uno de estos es un contenedor de acero revestido interiormente con refractarios, que difieren en la forma de construcción de acuerdo a su uso.

Son equipos de tratamiento los cuales se incluye tanto el sistema de inyección, como la adición de los agentes necesarios para los diferentes tratamientos.

Son revestidos del material refractario adecuado. El revestimiento refractario de las cucharas se compone de revestimiento de seguridad (permanente en el interior del depósito) y el revestimiento de trabajo, en contacto directo con acero fundido.

El revestimiento de seguridad no se suele desgastar, por lo que no requiere de reparaciones hasta largos periodos de uso, mientras los ladrillos refractarios o refractarios monolíticos en el revestimiento de trabajo se deben restaurar después de un período corto de uso.



El acero tratado se deposita en la artesa ("tundish") que es un recipiente cuya misión es la recepcionar el acero y asegurar una alimentación uniforme al equipo de colada continua.

La artesa se compone de una carcasa metálica a la que se une un revestimiento aislante y un revestimiento refractario permanente. El revestimiento de trabajo suele ser una masa monolítica básica (magnesita y olivino).



3.5 Hornos de ignición

Este tipo de horno es un horno de pre-tratamiento térmico de las materias primas a introducir en los altos hornos es una mezcla de polvo de mineral de hierro, polvo de coque y piedra caliza que se adiciona en el horno encendido. El producto resultante se llama mineral de sinterizado.

Las materias primas se extienden sobre una rejilla que se mueve continuamente a lo largo de la longitud del horno.

La ventilación se produce al encender los quemadores de la superficie de gas caliente. El horno se calienta a temperaturas que provocan que el material se funda y se convierta en mineral de hierro en polvo. Por lo tanto, las paredes laterales y el techo deben estar contruidos de un adecuado material refractario.

Una vez solidificado el material se muele a un tamaño adecuado y después se transporta a los altos hornos.

El horno en sí es un túnel con una unidad de entrada, una zona de ignición, una zona de explotación y una zona de salida, dispuestas de forma consecutiva.

El techo es una estructura compleja, con numerosos orificios quemador, que se revisten con un plástico de alta resistencia.

Por otra parte, en las paredes laterales se puede llegar a producir corrosión por el contacto con partículas volantes de las materias primas, por lo que se le ha de colocar también un plástico refractario con alta resistencia a la corrosión.

El periodo de mantenimiento de este horno es generalmente muy limitado. Normalmente se usa un sistema de instalación con piezas pre-fabricas, que permite la sustitución de sólo el techo, que es la zona que está sujeta a un mayor desgaste.

3.6 Hornos de recalentamiento

Dentro de estos tipos de horno podemos diferenciar:

- . Hornos pit o de fosa.
- . Hornos de empuje.
- . Hornos de solera galopante.
- . Hornos de solera giratoria.
- . Hornos de solera de rodillos.
- . Hornos de carro.

En estos hornos lo que se consigue es un calentamiento uniforme de lingotes a la temperatura deseada antes de laminar. Los lingotes en el interior del horno se colocan espaciados, para una mejor circulación de los gases de combustión. Estos lingotes se retiran cuando han alcanzado la temperatura deseada. El proceso que siguen es un sistema discontinuo o por lotes.

Los hornos de recalentamiento son cajas equipadas con un recuperador de calor de los gases de escape y su techo es una cubierta sólida.

Cada vez que la compuerta se abre, el interior sufre unos cambios bruscos de temperatura (choque térmico). En particular, la superficie interior de la cubierta y la parte superior de las paredes laterales están en contacto directo con el aire exterior y por tanto son expuestos al choque térmico.



El término hornos de recalentamiento se aplica a aquéllos en los que se aplica calor a la carga para elevar la temperatura de ésta, sin pretender que se produzca ninguna reacción química o cambio de estado, tal como fusión o vaporización.

En las características de los metales, la temperatura desempeña un papel de gran importancia. Por ejemplo: a temperaturas elevadas se

vuelven más blandos, capacitándolos para operaciones de deformación por flexión, forja, estampación, extrusión o laminación.

A temperaturas todavía más elevadas eliminan la acritud de los mismos. El proceso de calentamiento seguido de un enfriamiento, forma que no se produzca ninguna deformación, se conoce como recocido. El aumento de la temperatura por encima del punto crítico, seguida de un enfriamiento brusco, vuelve el acero más duro y resistente, pero con una ductilidad menor.

También se calientan los metales para absorber carbono, como en el caso de la cementación. El calentamiento de los metales, cualquiera que sea su objeto, se realiza en hornos, que se denominan comúnmente hornos de calentamiento o de recalentamiento, hornos de recocido y hornos de tratamiento térmico.

En este documento estamos considerando los hornos de recalentamiento, que tienen como objetivo fundamental el calentamiento de piezas para procesos posteriores tales como laminación, extrusión, forja, estampación y conformado.

Se mantiene el estado sólido de las piezas durante todo el período de calentamiento y empapado a temperatura, pretenden simplemente ablandar térmicamente el material para que sea más fácilmente maleable en la operación posterior.

4. Cálculos del revestimiento refractario:

4.1 Materiales a utilizar para la fabricación del revestimiento.

Los materiales que vamos a utilizar para la fabricación del revestimiento van a ser tanto materiales aislantes como refractarios.

Para el techo utilizaremos materiales de bajo peso puesto que el techo es desmontable y no nos permite colocar ningún material pesado, y aunque los hormigones aislantes son de baja densidad siempre pesaran más que un material de fibra cerámica comprimida.

Para las paredes usaremos materiales refractarios en la primera capa con una determinada resistencia mecánica, no muy alta pero si para evitar que se rompa en caso de haber golpes debido al tranco de palanquilla. Para las capas posteriores usaremos materiales de baja densidad tales como silicatos, fibras o microporosos, no será muy importante tener en cuenta si son o no resistentes mecánicamente puesto que irán cubiertos por el material refractario.

La zona mas importante de todo el horno, en cuanto a revestimiento se refiere, es la solera, tanto la parte móvil como la parte fija.

En esta zona usaremos un material con una elevada resistencia mecánica puesto que ira en contacto con la palanquilla de acero y tendrá que soportar bastantes impactos. Posteriormente colocaremos capas de materiales aislantes para reducir su temperatura a la requerida por el cliente.

Podemos diferenciar por tanto tres tipos de materiales a instalar:

- Paneles aislantes (Fibras cerámicas, silicatos y microporosos).
- Hormigones aislantes
- Hormigones refractarios

Ver tablas, paginas- 96,97.

4.2 Condiciones de trabajo de un horno en solera galopante.

En el proceso de un horno en solera galopante las condiciones de trabajo están supeditadas a la cantidad de toneladas de material que se quiera procesar, a las temperaturas que se quieran obtener en chapa y a la cantidad de calor perdido que se quiere evacuar.

Normalmente la temperatura de trabajo de un horno de recalentamiento no excede de los 1200 ° C.

En el caso que nos aborda las condiciones de trabajo son las siguientes:

Temperatura interior: 1200 ° C

Temperatura exterior en chapa

- Techo < 85 °C
- Paredes < 95°C
- Solera < 95°C

Espesor de 400 mm de revestimiento en solera

Limite de 300 mm en paredes

Limite de 300 mm en techo

El revestimiento ha de ir anclado tanto en techo como en paredes y solera

Coeficientes de convección; Exterior 13 W/mk e Interior 700 W/mk

No se tiene en cuenta las perdidas de calor generadas por radiación y a si mismo no se verán involucrados los coeficientes de emisividad.

Un dato a tener en cuenta son las perdidas de calor que se van a producir durante el proceso.

Según las especificaciones que da el cliente las pérdidas de calor no han de exceder de:

- 700W/m² en el techo
- 800W/m² en paredes
- 650W/m² en solera.

4.3. Cálculos térmicos para diseño de revestimiento refractario

Se entiende por flujo térmico el proceso por el cuál una fuente de calor transmite calor a través de una pared sólido a un medio frío. Teniendo en cuenta las consideraciones previas, el proceso puede estar dividido en tres partes:

- Transferencia térmica del medio caliente al muro
- Conducción térmica a través del muro
- Transferencia térmica del muro al medio frío

Para los cálculos han de conocerse los valores de las siguientes magnitudes:

- La temperatura interior del horno T_i
- La temperatura ambiente tras la pared externa del horno T_a .
- El coeficiente de transferencia térmica interior h_i
- El coeficiente de transferencia térmica exterior h_e
- La estructura del muro teniendo en cuenta su forma y espesor de las distintas capas X
- Los coeficientes de conductividad térmica K [W/mk] de los materiales y su variación con la temperatura.

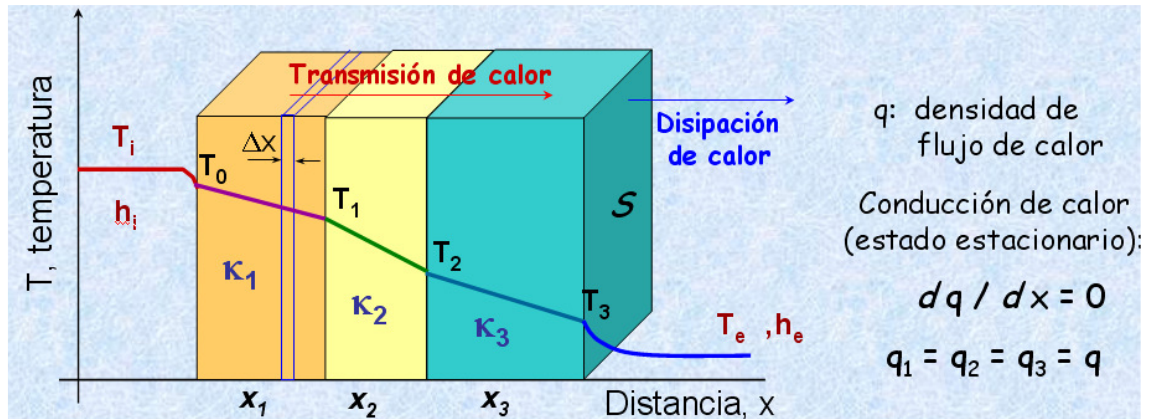
Con estos datos se debe obtener

- La densidad del flujo térmico
- Las temperaturas en las superficies del muro y en las distintas capas

El objetivo principal es evaluar el revestimiento refractario y la correcta selección del tipo de materiales y el dimensionado de los muros o capas. La densidad del flujo térmico es una medida indicativa de las posibles pérdidas de calor, es decir, la energía que se emita hacia el exterior del horno y que por tanto habrá que aportar para mantener la temperatura adecuada en el interior del mismo. Partiendo de las temperaturas de las capas intermedias y de las temperaturas medias, podemos evaluar si los materiales seleccionados soportaran los requerimientos técnicos existentes.

El proceso en el cual estamos haciendo el estudio se puede considerar como un proceso estacionario y que las condiciones de contorno no se modifican con el tiempo.

El esquema a seguir para el cálculo tanto del flujo térmico como para las distintas temperaturas será:



Determinamos la densidad del flujo térmico:

$$\dot{q} = (T_i - T_1) \cdot h_i \quad (1)$$

Para la conducción térmica a través de las paredes con "n" capas:

$$\dot{q} = \frac{T_n - T_{n+1}}{R_{teq}} \quad (2)$$

Donde el valor de la resistencia térmica de equivalente R_{teq} :

$$R_{teq} = R_i + R_e + R_1 + R_2 + R_3 + R_n \quad (3)$$

$$R_n = \frac{x_n}{k_n}; R_i = \frac{1}{h_i}; R_e = \frac{1}{h_e} \quad (4)$$

Por tanto el valor en cada capa del horno será:

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_{teq} \quad \text{Para un } n = 1 \text{ a } n \quad (5)$$

Para el cálculo de la transferencia térmica al exterior, partiendo de:

$$\dot{q} = (T_{n+1} - T_e) \cdot h_e \quad (6)$$

Despejando la ecuación anterior queda:

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \quad (7)$$

Nota: no se tendrán en cuenta los valores resultantes por radiación.

4.3.1 Calculo de la temperatura del techo:

Condiciones iniciales:

Temperatura interior $T_i = 1200^\circ\text{C}$.

Temperatura exterior $T_e = 22^\circ\text{C}$.

Coeficiente de transferencia térmica interior $h_i = 700 \text{ W/m}^2\text{k}$.

Coeficiente de transferencia térmica exterior $h_e = 13 \text{ W/m}^2\text{k}$.

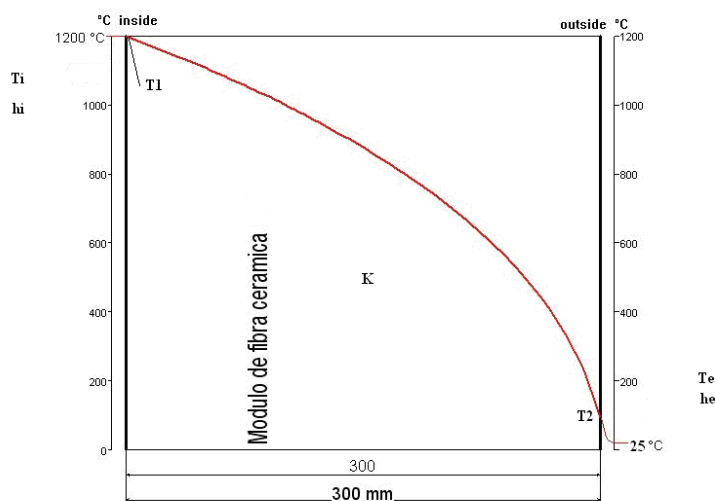
Límite del revestimiento 300 mm.

Datos a obtener:

Flujo de calor \dot{q}

Temperatura a obtener en chapa $< 85^\circ\text{C}$

Un ejemplo de cómo debe de quedar el revestimiento puede ser:



Los coeficientes de transmisión térmica se han obtenido de referencias de casos prácticos.

Los materiales que se utilizan en el caso del techo son módulos de fibra cerámica.

Según (2) para las resistencias térmicas interior y exterior aplicamos;

$$R_i = \frac{1}{h_i} = \frac{1}{700 \text{ W/m}^2\text{K}} = 0.00148 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_e = \frac{1}{h_e} = \frac{1}{13 \text{ W/m}^2\text{K}} = 0.0769 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Estimamos la temperatura media que se da en la capa para poder elegir un valor de conductividad del material para poder realizar los cálculos:

$$T_m = \frac{T_i + T_e}{2} = \frac{1200^\circ\text{C} + 25^\circ\text{C}}{2} = 612.5^\circ\text{C}$$

Una vez conocida esta estimación vamos a la tabla 3 y vemos que conductividad corresponde a cada tipo de módulo por medio de una interpolación:

Módulos de fibra cerámica 160 Kg/m³ a 612.5 °C= 0.26 W/mk

$$x = 0.26 + (612.5 - 600) \cdot \frac{(0.31 - 0.26)}{(800 - 600)} = 0.26 \text{ W/mk}$$

Módulos de fibra cerámica 192 Kg/m³ a 612.5 °C= 0.21 W/mk

$$x = 0.21 + (612.5 - 600) \cdot \frac{(0.30 - 0.21)}{(800 - 600)} = 0.21 \text{ W/mk}$$

Módulos de fibra cerámica 240 Kg/m³ a 612.5 °C= 0.16 W/mk

$$x = 0.16 + (612.5 - 600) \cdot \frac{(0.19 - 0.16)}{(800 - 600)} = 0.16 \text{ W/mk}$$

De acuerdo con (4)

Para el módulo de 160 Kg/m³

$$R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.3 \text{ m}}{0.26 \text{ W/mk}} = 1.153 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Para el módulo de 192 Kg/m³

$$R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.3m}{0.21 \frac{W}{mk}} = 1.428 \frac{m^2 k}{W}$$

Para el módulo de 240 Kg/m³

$$R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.3m}{0.16 \frac{W}{mk}} = 1.875 \frac{m^2 k}{W}$$

El valor de la resistencia térmica equivalente será:

$$R_{teq} = R_i + R_e + R_l$$

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1}$$

Por tanto el resultado del flujo de calor según (7) y el valor de T1 y T2 según (5) para cada uno de los módulos es:

- Para el módulo de 160 Kg./m³

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} = 0.00148 + 0.0769 + 1.153 = 1.231 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.231 \frac{m^2 k}{W}} = 956.94 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_{teq}$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 956.94 \frac{W}{m^2} = 1198.58^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_l \cdot \dot{q} = 1198.58^\circ C - 1.153 \frac{m^2 k}{W} \cdot 956.94 \frac{W}{m^2} = 95.22^\circ C$$

- Para el módulo de 192 Kg./m³

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} = 0.00148 + 0.0769 + 1.428 = 1.506 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 25^\circ C}{1.506 \frac{m^2 k}{W}} = 782.2 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_{teq}$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 782.2 \frac{W}{m^2} = 1198.84^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_l \cdot \dot{q} = 1198.84^\circ C - 1.428 \frac{m^2 k}{W} \cdot 782.2 \frac{W}{m^2} = 81.85^\circ C$$

- Para el módulo de 240 Kg./m³

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} = 0.00148 + 0.0769 + 1.875 = 1.953 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ \text{C} - 22^\circ \text{C}}{1.953 \text{ m}^2 \text{ k/W}} = 603.17 \text{ W/m}^2$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_{teq}$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ \text{C} - 0.00148 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 603.17 \text{ W/m}^2 = 1199.10^\circ \text{C}$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1199.10^\circ \text{C} - 1.875 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 603.17 \text{ W/m}^2 = 68.15^\circ \text{C}$$

Tabla resumen de resultados:

| | Flujo de calor W/m ² | T ^a en chapa T ₂ (°C) |
|-------------------------------|---------------------------------|---|
| Módulo 160 Kg./m ³ | 956.94 | 95.22 |
| Módulo 192 Kg./m ³ | 782.2 | 81.85 |
| Módulo 240 Kg./m ³ | 603.17 | 68.15 |

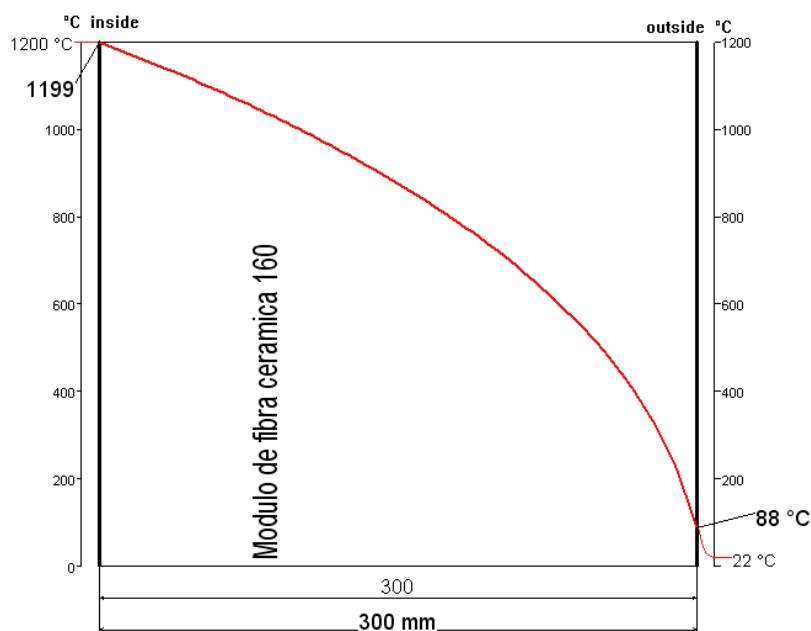
A la vista de los resultados obtenidos el material que puede instalarse en el techo del horno puede ser tanto el módulo de 192 Kg./m³ como el de 240 Kg./m³, pero si se aprecia el calor perdido entre uno y otro es bastante, por ello se elegiría el módulo de 240 Kg./m³

Si se prueba a realizar los cálculos mediante el software iterativo obtenemos los siguientes resultados:

| Datos de la aplicación Módulos de Fibra cerámica 160 Kg./m ³ | | | |
|---|----------|------------|--------------------------------------|
| Geometría: | x plana | cilíndrica | esférica |
| Orientación: | solera | x bóveda | pared |
| | Interior | Exterior | |
| Temperatura (°C) | 1200 | 22 | Base de cálculo (interior): ASTM-680 |
| Coeficiente α (W/m ² K) | 700 | 14.1113.48 | Base de cálculo (exterior): ASTM-680 |
| Fuentes de calor (W/m ²) | -- | -- | Emisividad (e) interior: - |
| Diámetro (mm) | -- | -- | Emisividad (e) exterior: - |
| Calor transmitido (W/m ²) | 927.1 | | Velocidad del viento: - |

| RESULTADOS | | | | | |
|-------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------|------------|
| MATERIAL | ESPESOR (mm) | CALOR ALMACENADO (MJ/m ²) | CONDUCTIVIDAD (W/mK) | TEMPERATURA (°C) | |
| | | | | Media | Superficie |
| Mod. F.C160 | 300 | 40.27 | 0.3094 | 818.8819.3 | 1198.7 |
| Total: | 300 | 40.27 | Temperatura de chapa: | | 87.7 |

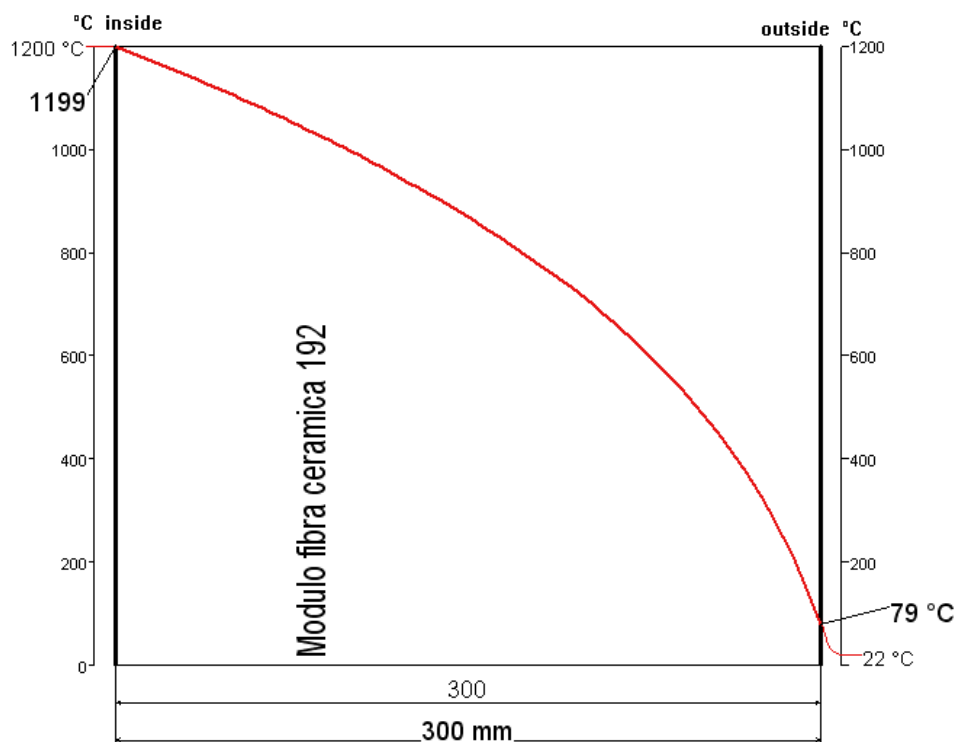
| OBSERVACIONES |
|--|
| La temperatura final obtenida esta por encima de la permitida, la cual tiene que ser menor de 85°C. Será una configuración no válida |



| Datos de la aplicación Módulos de fibra cerámica 192 Kg./m ³ | | | |
|---|----------|------------|--------------------------------------|
| Geometría: | x plana | cilíndrica | esférica |
| Orientación: | solera | x bóveda | pared |
| | Interior | Exterior | |
| Temperatura (°C) | 1200 | 22 | Base de cálculo (interior): ASTM-680 |
| Coeficiente α (W/m ² K) | 700 | 13.58 | Base de cálculo (exterior): ASTM-680 |
| Fuentes de calor (W/m ²) | -- | -- | Emisividad (e) interior: - |
| Diámetro (mm) | -- | -- | Emisividad (e) exterior: - |
| Calor transmitido (W/m ²) | 776.6 | | Velocidad del viento: - |

| RESULTADOS | | | | | |
|-------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------|------------|
| MATERIAL | ESPESOR (mm) | CALOR ALMACENADO (MJ/m ²) | CONDUCTIVIDAD (W/mK) | TEMPERATURA (°C) | |
| | | | | Media | Superficie |
| Mod. F.C192 | 300 | 47.56 | 0.2534 | 808.4 | 1198.9 |
| Total: | 300 | 47.56 | Temperatura de chapa: | | 79.2 |

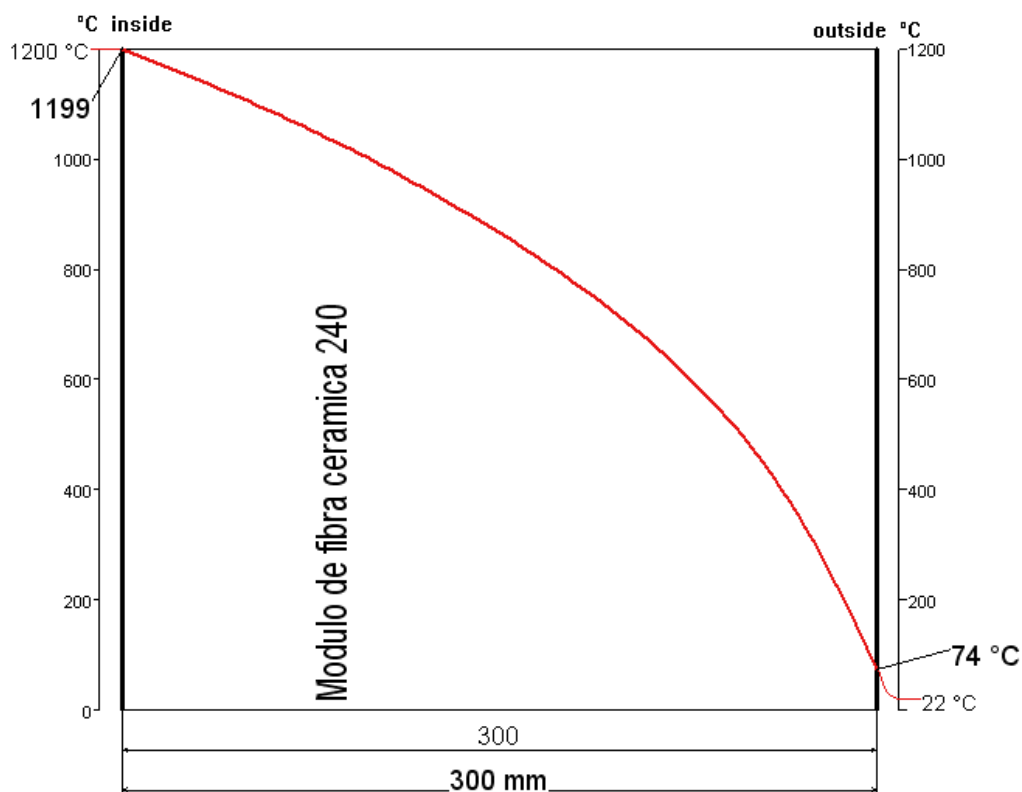
| OBSERVACIONES |
|--|
| Este tipo de material nos podría valer, puesto que la temperatura es ligeramente inferior a la permitida, aunque estaría muy cerca del límite. |



| Datos de la aplicación Módulos de fibra cerámica 240 Kg./m ³ | | | |
|---|----------|------------|--------------------------------------|
| Geometría: | x plana | cilíndrica | esférica |
| Orientación: | solera | x bóveda | pared |
| | Interior | Exterior | |
| Temperatura (°C) | 1200 | 22 | Base de cálculo (interior): ASTM-680 |
| Coeficiente α (W/m ² K) | 700 | 13.24 | Base de cálculo (exterior): ASTM-680 |
| Fuentes de calor (W/m ²) | -- | -- | Emisividad (e) interior: - |
| Diámetro (mm) | -- | -- | Emisividad (e) exterior: - |
| Calor transmitido (W/m ²) | 688.1 | | Velocidad del viento: - |

| RESULTADOS | | | | | |
|--------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------|------------|
| MATERIAL | ESPESOR (mm) | CALOR ALMACENADO (MJ/m ²) | CONDUCTIVIDAD (W/mK) | TEMPERATURA (°C) | |
| | | | | Media | Superficie |
| Mod. F.C 240 | 300 | 59.06 | 0.2215 | 804.8 | 1199 |
| Total: | 300 | 59.06 | Temperatura de chapa: | | 74 |

| OBSERVACIONES |
|---|
| Este material será el idóneo para revestir el techo del horno, vemos que cumple con la temperatura en chapa y las perdidas que obtenemos de calor son bastante menores que en los casos anteriores. |



4.3.2 Cálculos de la temperatura en las paredes:

Condiciones iniciales:

Temperatura interior $T_i = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura exterior $T_e = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

Coeficiente de transferencia térmica interior $h_i = 700\text{ W/m}^2\text{k}$

Coeficiente de transferencia térmica exterior $h_e = 13\text{ W/m}^2\text{k}$

Límite del revestimiento 300 mm.

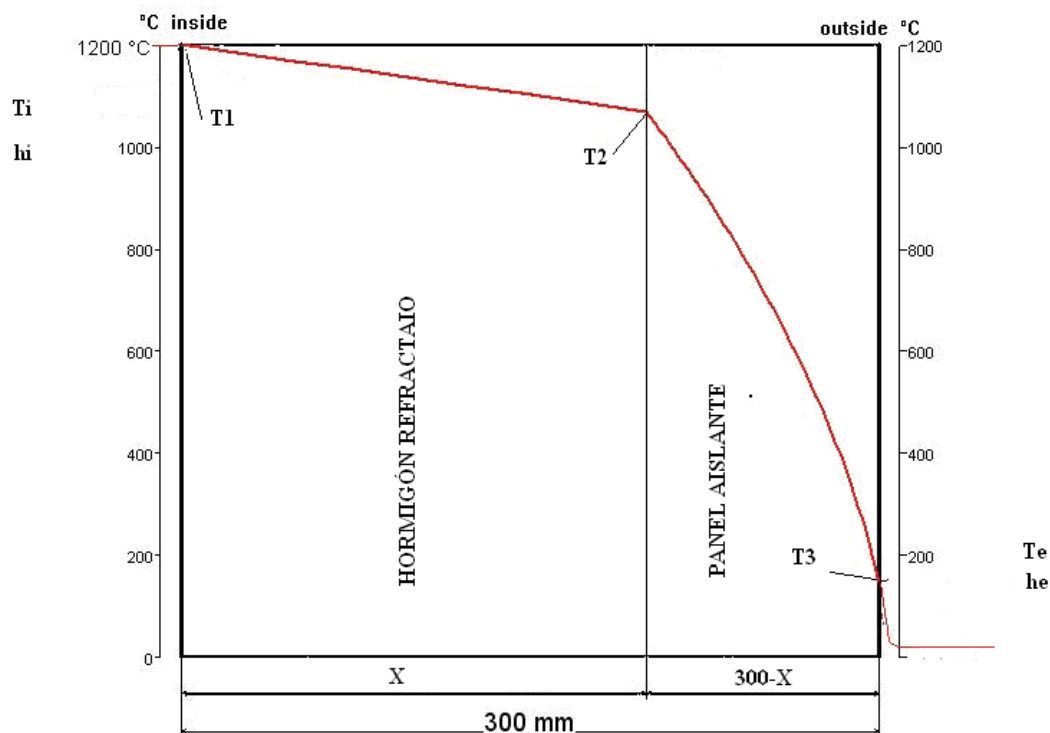
Datos a obtener:

Flujo de calor \dot{q}

Temperatura a obtener en chapa $< 95\text{ }^{\circ}\text{C}$

Seguimos con las mismas características de trabajo, la diferencia que existe con el caso del techo es que no solo se pone una capa de material, sino que será necesario poner varias capas debido a que en las paredes se pueden producir choches, atrancos etc., del material a tratar. La capa que esta en contacto con el calor ha de ser de un material con alta o media resistencia mecánica que trae como consecuencia que no elimina bien el calor, por eso habrá que poner varias capas.

La configuración que tiene se puede aproximar a:



Es una posible aproximación y se tiene que comprobar que realmente con dos materiales puede hacerse el revestimiento.

Los materiales a tener en cuenta en esta zona serán paneles aislantes y hormigones refractarios.

El proceso de calculo es igual que en el proceso seguido en el techo.

Según (2) para las resistencias térmicas interior y exterior que aplicamos;

$$R_i = \frac{1}{h_i} = \frac{1}{700 \frac{W}{m^2 k}} = 0.00148 m^2 k / W$$

$$R_e = \frac{1}{h_e} = \frac{1}{13 \frac{W}{m^2 k}} = 0.0769 m^2 k / W$$

Estimamos la temperatura media que se da en cada capa para poder elegir un valor de conductividad del material para poder realizar los cálculos:

T_{m1} : Temperatura media de la primera capa de trabajo

$$T_{m1} = \frac{T_i + T_1}{2} = \frac{1200^\circ C + 900^\circ C}{2} = 1050^\circ C$$

T_{m2} : Temperatura media de la segunda capa de trabajo

$$T_{m2} = \frac{T_1 + T_e}{2} = \frac{1050^\circ C + 22^\circ C}{2} = 536^\circ C$$

Una vez conocida esta estimación vamos a la Tabla.1, Tabla.4 y Tabla.5 y vemos que conductividad corresponde a cada tipo de material, volviendo a tener que interpolar par sacar la conductividad a la temperatura media:

Hortix 1240 a $1050^\circ C = 1.29 W/mk$

$$x = 1.28 + (1050 - 1000) \cdot \frac{(1.32 - 1.28)}{(1200 - 1000)} = 1.29 \frac{W}{mk}$$

Hortix 1260 a $1050^\circ C = 1.76 W/mk$

$$x = 1.72 + (1050 - 1000) \cdot \frac{(1.88 - 1.72)}{(1200 - 1000)} = 1.76 \frac{W}{mk}$$

Hortix 1285 a 1000-1100 °C= 2.46 W/mk

$$x = 2.42 + (1050 - 1000) \cdot \frac{(2.58 - 2.42)}{(1200 - 1000)} = 2.46 \text{ W/mk}$$

Hacemos lo mismo con las tablas de paneles aislantes Tabla.4 y Tabla.5:

Silicato cálcico de 1000°C a 536 °C= 0.17 W/mk

$$x = 0.14 + (536 - 400) \cdot \frac{(0.18 - 0.14)}{(600 - 400)} = 0.167 \text{ W/mk}$$

Silicato cálcico de 1100°C a 536 °C= 0.14 W/mk

$$x = 0.10 + (536 - 400) \cdot \frac{(0.16 - 0.10)}{(600 - 400)} = 0.141 \text{ W/mk}$$

Microporoso de 1000°C a 536 °C= 0.028 W/mk

$$x = 0.025 + (536 - 400) \cdot \frac{(0.030 - 0.025)}{(600 - 400)} = 0.028 \text{ W/mk}$$

Microporoso de 1100°C a 536 °C= 0.032 W/mk

$$x = 0.028 + (536 - 400) \cdot \frac{(0.034 - 0.028)}{(600 - 400)} = 0.032 \text{ W/mk}$$

Conocidas las conductividades establecemos una configuración de materiales que determinará el cálculo.

| | CONFIGURACIONES | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 | P12 |
| Hortix 1240 | x | x | x | x | | | | | | | | |
| Hortix 1260 | | | | | x | x | x | x | | | | |
| Hortix 1285 | | | | | | | | | x | x | x | x |
| SiCa- 1000° C | x | | | | x | | | | x | | | |
| SiCa- 1100° C | | x | | | | x | | | | x | | |
| Microporoso 1000° C | | | x | | | | x | | | | x | |
| Microporoso 1100° C | | | | x | | | | x | | | | x |

Al estar limitados en las dimensiones del revestimiento se prueba con las siguientes dimensiones en cada capa:

Hormigón refractario= 200 mm.

Panel aislante= 100 mm.

Según (4) el valor de las resistencias térmicas para cada material es:

$$\text{- Para el Hortix 1240} \quad R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.2m}{1.29 \frac{W}{mk}} = 0.155 \frac{m^2 k}{W}$$

$$\text{- Para el Hortix 1260} \quad R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.2m}{1.76 \frac{W}{mk}} = 0.113 \frac{m^2 k}{W}$$

$$\text{- Para el Hortix 1285} \quad R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.2m}{2.42 \frac{W}{mk}} = 0.0813 \frac{m^2 k}{W}$$

$$\text{- Para el SiCa } 1000^{\circ} \text{ C} \quad R_{t2} = \frac{x_2}{k_2} = \frac{0.1m}{0.17 \frac{W}{mk}} = 0.588 \frac{m^2 k}{W}$$

$$\text{- Para el SiCa } 1100^{\circ} \text{ C} \quad R_{t2} = \frac{x_2}{k_2} = \frac{0.1m}{0.14 \frac{W}{mk}} = 0.714 \frac{m^2 k}{W}$$

$$\text{- Para el Microporoso } 1000^{\circ} \text{ C} \quad R_{t2} = \frac{x_2}{k_2} = \frac{0.1m}{0.028 \frac{W}{mk}} = 3.57 \frac{m^2 k}{W}$$

$$\text{- Para el Microporoso } 1100^{\circ} \text{ C} \quad R_{t2} = \frac{x_2}{k_2} = \frac{0.1m}{0.032 \frac{W}{mk}} = 3.125 \frac{m^2 k}{W}$$

El valor de la resistencia térmica equivalente será:

$$R_{teq} = R_i + R_e + R_{t1} + R_{t2}$$

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2}$$

Por tanto el resultado del flujo de calor según (7) y el valor de T1, T2 y T3 según (5) para cada una de las configuraciones es:

- Configuración P1

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_2 = 0.00148 + 0.0769 + 0.155 + 0.588 = 0.821 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ \text{C} - 22^\circ \text{C}}{0.821 \text{ m}^2 \text{ k/W}} = 1434.83 \text{ W/m}^2$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_1 \cdot \dot{q} = 1200^\circ \text{C} - 0.00148 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 1434.83 \text{ W/m}^2 = 1197.87^\circ \text{C}$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1197.87^\circ \text{C} - 0.155 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 1434.83 \text{ W/m}^2 = 975.47^\circ \text{C}$$

$$T_3 = T_2 - R_2 \cdot \dot{q} = 975.47^\circ \text{C} - 0.588 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 1434.83 \text{ W/m}^2 = 131.7^\circ \text{C}$$

- Configuración P2

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_2 = 0.00148 + 0.0769 + 0.155 + 0.714 = 0.947 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ \text{C} - 22^\circ \text{C}}{0.947 \text{ m}^2 \text{ k/W}} = 1243.92 \text{ W/m}^2$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_1 \cdot \dot{q} = 1200^\circ \text{C} - 0.00148 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 1243.92 \text{ W/m}^2 = 1198.16^\circ \text{C}$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1198.16^\circ \text{C} - 0.155 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 1243.92 \text{ W/m}^2 = 1005.3^\circ \text{C}$$

$$T_3 = T_2 - R_2 \cdot \dot{q} = 1005.3^\circ \text{C} - 0.714 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 1243.92 \text{ W/m}^2 = 117.14^\circ \text{C}$$

- Configuración P3

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_2 = 0.00148 + 0.0769 + 0.155 + 3.57 = 3.8 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ \text{C} - 22^\circ \text{C}}{3.8 \text{ m}^2 \text{ k/W}} = 310 \text{ W/m}^2$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 310 \frac{W}{m^2} = 1198.5^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1198.5^\circ C - 0.155 \frac{m^2 k}{W} \cdot 310 \frac{W}{m^2} = 1151.49^\circ C$$

Este cálculo se para aquí, la temperatura T2 debe ser menor de 1000 °C.

- Configuración P4

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_2 = 0.00148 + 0.0769 + 0.155 + 3.125 = 3.35 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{3.35 \frac{m^2 k}{W}} = 351.64 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 351.64 \frac{W}{m^2} = 1199.47^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1199.47^\circ C - 0.155 \frac{m^2 k}{W} \cdot 351.64 \frac{W}{m^2} = 1144.96^\circ C$$

Paramos los cálculos en este punto por la misma razón que en el caso anterior, pero en este caso la T2 es superior a 1100°C.

- Configuración P5

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_2 = 0.00148 + 0.0769 + 0.113 + 0.588 = 0.779 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{0.779 \frac{m^2 k}{W}} = 1512.19 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 1512.19 \frac{W}{m^2} = 1197.76^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1197.76^\circ C - 0.113 \frac{m^2 k}{W} \cdot 1512.19 \frac{W}{m^2} = 1026.88^\circ C$$

La T3 no hace falta que la calculemos puesto que T2 es mayor de 1000° C, y por tanto el silicato cálcico de 1000 °C no puede trabajar por encima de su temperatura de trabajo.

- Configuración P6

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_2 = 0.00148 + 0.0769 + 0.113 + 0.714 = 0.905 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ \text{C} - 22^\circ \text{C}}{0.905 \text{ m}^2 \text{ k/W}} = 1301.65 \text{ W/m}^2$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ \text{C} - 0.00148 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 1301.65 \text{ W/m}^2 = 1198.07^\circ \text{C}$$

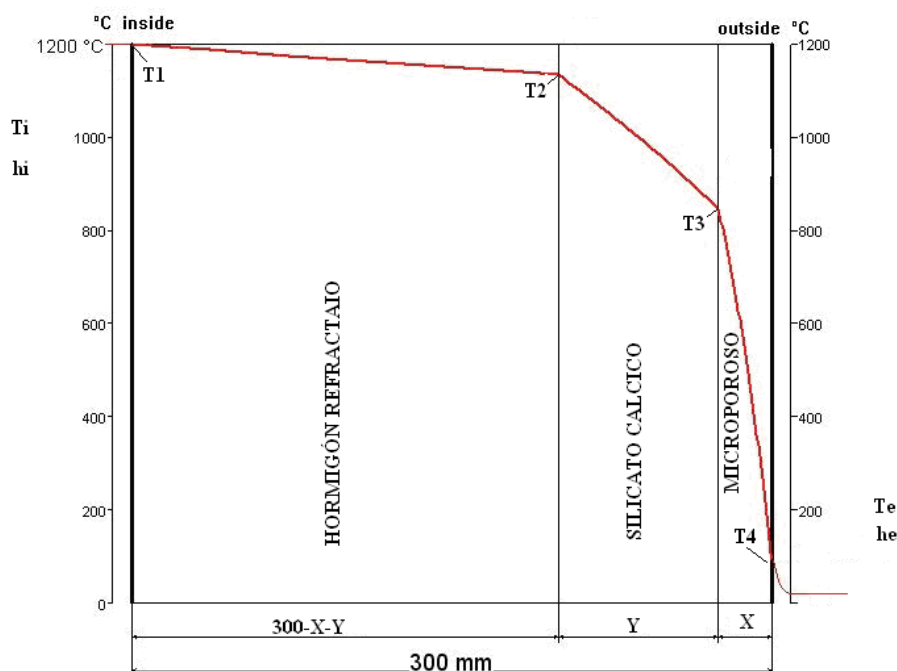
$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1198.07^\circ \text{C} - 0.113 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 1301.65 \text{ W/m}^2 = 1050.98^\circ \text{C}$$

$$T_3 = T_2 - R_2 \cdot \dot{q} = 1050.98^\circ \text{C} - 0.714 \text{ m}^2 \text{ k/W} \cdot 1301.65 \text{ W/m}^2 = 121.60^\circ \text{C}$$

La temperatura obtenida en la última capa es más elevada que la temperatura exigida.

No hace falta que se calculen mas configuraciones ya que las temperaturas de salida serán mas elevadas que las permitidas, en unos casos será T2 la que sea superior y en otros la temperatura final en chapa T3.

Una posible solución es colocar otra capa más de panel aislante, en concreto de microporoso quedando aproximadamente de la siguiente manera:



Hay que volver a estimar la temperatura media que se da en cada capa para poder elegir un valor de conductividad del material para poder realizar los cálculos:

T_{m1}: Temperatura media de la primera capa de trabajo

$$T_{m1} = \frac{T_i + T_1}{2} = \frac{1200^{\circ}C + 1000^{\circ}C}{2} = 1100^{\circ}C$$

T_{m2}: Temperatura media de la segunda capa de trabajo

$$T_{m2} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{1100^{\circ}C + 900^{\circ}C}{2} = 1000^{\circ}C$$

T_{m3}: Temperatura media de la tercera capa de trabajo

$$T_{m3} = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{1000^{\circ}C + 22^{\circ}C}{2} = 511^{\circ}C$$

Los valores de las conductividades en base a la Tabla.1, Tabla.3 y Tabla.4 de los distintos materiales, realizando las interpolaciones pertinentes son:

Hortix 1240 a 1100 °C= 1.30 W/mk

$$x = 1.28 + (1100 - 1000) \cdot \frac{(1.32 - 1.28)}{(1200 - 1000)} = 1.30 \text{ W/mk}$$

Hortix 1260 a 1100°C= 1.80 W/mk

$$x = 1.72 + (1100 - 1000) \cdot \frac{(1.88 - 1.72)}{(1200 - 1000)} = 1.80 \text{ W/mk}$$

Hortix 1285 a 1100°C= 2.50 W/mk

$$x = 2.42 + (1100 - 1000) \cdot \frac{(2.58 - 2.42)}{(1200 - 1000)} = 2.5 \text{ W/mk}$$

Silicato cálcico de 1000°C a 1000°C=

No usamos en este caso el SiCa para 1000 °C puesto que no puede trabajar por encima de su temperatura de trabajo y las condiciones serian muy extremas.

Silicato cálcico de 1100°C a 1000°C = 0.22 W/mk

Microporoso de 1000°C a 511°C = 0.028 W/mk

$$x = 0.025 + (511 - 400) \cdot \frac{(0.030 - 0.025)}{(600 - 400)} = 0.028 \text{ W/mk}$$

Microporoso de 1100°C a 511 °C = 0.031 W/mk

$$x = 0.028 + (511 - 400) \cdot \frac{(0.032 - 0.028)}{(600 - 400)} = 0.031 \text{ W/mk}$$

Por tanto se pueden dar las siguientes configuraciones:

| | CONFIGURACIONES | | | | | |
|-------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | P13 | P14 | P15 | P16 | P17 | P18 |
| Hortix 1240 | x | x | | | | |
| Hortix 1260 | | | x | x | | |
| Hortix 1285 | | | | | x | x |
| SiCa- 1100° | x | x | x | x | x | x |
| Microporoso 1000° | x | | x | | x | |
| Microporoso 1100° | | x | | x | | x |

La nueva disposición de las capas será:

Hormigón refractario = 200 mm

Silicato Cálcico = 50 mm

Microporoso = 50mm

Según (4) el valor de las resistencias térmicas para cada material es:

- Para el Hortix 1240 $R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.2m}{1.30 \text{ W/mk}} = 0.153 \text{ m}^2 \text{ k/W}$

- Para el Hortix 1260 $R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.2m}{1.8 \text{ W/mk}} = 0.111 \text{ m}^2 \text{ k/W}$

- Para el Hortix 1285 $R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.2m}{2.50 \text{ W/mk}} = 0.080 \text{ m}^2 \text{ k/W}$

- Para el SiCa 1100° C $R_{t2} = \frac{x_2}{k_2} = \frac{0.05m}{0.22 \frac{W}{mk}} = 0.227 \frac{m^2 k}{W}$
- Para el Microporoso 1000° C $R_{t3} = \frac{x_3}{k_3} = \frac{0.05m}{0.028 \frac{W}{mk}} = 1.785 \frac{m^2 k}{W}$
- Para el Microporoso 1100° C $R_{t3} = \frac{x_3}{k_3} = \frac{0.05m}{0.031 \frac{W}{mk}} = 1.613 \frac{m^2 k}{W}$

Por tanto el resultado del flujo de calor según (7) y el valor de T1, T2 y T3 según (5) para cada una de las configuraciones es:

- Configuración P13

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} = 0.00148 + 0.0769 + 0.153 + 0.227 + 1.785 = 2.243 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{2.243 \frac{m^2 k}{W}} = 525.18 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 525.18 \frac{W}{m^2} = 1199.22^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1199.22^\circ C - 0.153 \frac{m^2 k}{W} \cdot 525.18 \frac{W}{m^2} = \underline{\underline{1118.86^\circ C}}$$

Se observa que la temperatura a la que trabaja el silicato cálcico es superior a la temperatura de trabajo que este puede soportar, por tanto se desestiman estos espesores y se ha de buscar una nueva composición de las capas.

No se calcula con el resto de hormigones refractarios puesto que el resto de hormigones refractarios al tener una conductividad mayor que el Hortix 1240 la temperatura T2 estará por encima de los 100 °C y por tanto no vale.

Se cambia la disposición de las capas a:

Hormigón refractario = 200 mm

Silicato Cálcico = 75 mm

Microporoso = 25mm

Las resistencias térmicas tanto del silicato cálcico como del microporoso cambiarán, obteniéndose los siguientes resultados:

- Para el SiCa 1100° C $R_{t2} = \frac{x_2}{k_2} = \frac{0.075m}{0.22 \frac{W}{mk}} = 0.341 \frac{m^2 k}{W}$
- Para el Microporoso 1000° C $R_{t3} = \frac{x_3}{k_3} = \frac{0.025m}{0.028 \frac{W}{mk}} = 0.892 \frac{m^2 k}{W}$
- Para el Microporoso 1100° C $R_{t3} = \frac{x_3}{k_3} = \frac{0.025m}{0.031 \frac{W}{mk}} = 0.806 \frac{m^2 k}{W}$

Se vuelve a calcular a partir de la configuración 13 donde según (7) y el valor de T1, T2 y T3 según (5) para cada una de las configuraciones es:

- Configuración P13.1

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} = 0.00148 + 0.0769 + 0.153 + 0.341 + 0.892 = 1.464 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.464 \frac{m^2 k}{W}} = 804.64 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_1 \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 804.64 \frac{W}{m^2} = 1198.80^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1198.80^\circ C - 0.153 \frac{m^2 k}{W} \cdot 804.64 \frac{W}{m^2} = 1075.69^\circ C$$

$$T_3 = T_2 - R_2 \cdot \dot{q} = 1075.69^\circ C - 0.341 \frac{m^2 k}{W} \cdot 804.64 \frac{W}{m^2} = 801.30^\circ C$$

$$T_4 = T_3 - R_3 \cdot \dot{q} = 801.30^\circ C - 0.892 \frac{m^2 k}{W} \cdot 804.64 \frac{W}{m^2} = 83.56^\circ C$$

- Configuración P14

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} = 0.00148 + 0.0769 + 0.153 + 0.341 + 0.806 = 1.378 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.378 m^2 k/W} = 854.86 W/m^2$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_1 \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 m^2 k/W \cdot 854.86 W/m^2 = 1198.73^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1198.73^\circ C - 0.153 m^2 k/W \cdot 854.86 W/m^2 = 1067.93^\circ C$$

$$T_3 = T_2 - R_2 \cdot \dot{q} = 1067.93^\circ C - 0.341 m^2 k/W \cdot 854.86 W/m^2 = 776.42^\circ C$$

$$T_4 = T_3 - R_3 \cdot \dot{q} = 776.42^\circ C - 0.806 m^2 k/W \cdot 854.86 W/m^2 = 87.40^\circ C$$

- Configuración P15

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} = 0.00148 + 0.0769 + 0.111 + 0.341 + 0.892 = 1.422 m^2 k/W$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.422 m^2 k/W} = 828.41 W/m^2$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_1 \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 m^2 k/W \cdot 828.41 W/m^2 = 1198.77^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1198.77^\circ C - 0.111 m^2 k/W \cdot 828.41 W/m^2 = 1106.81^\circ C$$

Se para de calcular puesto que la temperatura T2 esta prácticamente al limite de la temperatura de trabajo a la que el silicato puede trabajar

- Configuración P16

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} = 0.00148 + 0.0769 + 0.111 + 0.341 + 0.862 = 1.336 m^2 k/W$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.336 m^2 k/W} = 881.73 W/m^2$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 881.73 \frac{W}{m^2} = 1198.69^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1198.69^\circ C - 0.111 \frac{m^2 k}{W} \cdot 881.73 \frac{W}{m^2} = 1100.81^\circ C$$

No se calcula más puesto que la temperatura T2 excede de la permitida

- Configuración P17

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} = 0.00148 + 0.0769 + 0.080 + 0.341 + 0.926 = 1.391 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.391 \frac{m^2 k}{W}} = 846.87 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 846.87 \frac{W}{m^2} = 1198.74^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1198.74^\circ C - 0.080 \frac{m^2 k}{W} \cdot 846.87 \frac{W}{m^2} = 1130.99^\circ C$$

No se calcula más puesto que la temperatura T2 excede de la permitida

- Configuración P18

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} = 0.00148 + 0.0769 + 0.080 + 0.341 + 0.806 = 1.305 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.305 \frac{m^2 k}{W}} = 902.68 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 902.68 \frac{W}{m^2} = 1198.66^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1198.66^\circ C - 0.080 \frac{m^2 k}{W} \cdot 902.68 \frac{W}{m^2} = 1126.44^\circ C$$

No se calcula más puesto que la temperatura T2 excede de la permitida

A continuación se muestra la tabla resumen con los cálculos obtenidos:

| Espesores de capas | Configuraciones | Flujo de calor W/m2 | T1 °C | T2 °C | T3 °C | |
|---|-----------------|---------------------|---------|---------|--------|-------|
| Hormigón refractario 200 mm Panel aislante 100 mm | P1 | 1434,83 | 1197,87 | 975,47 | 131,70 | |
| | P2 | 1243,92 | 1198,16 | 1005,30 | 117,14 | |
| | P3 | 310,00 | 1198,50 | 1151,49 | - | |
| | P4 | 351,64 | 1197,47 | 1144,96 | - | |
| | P5 | 1512,19 | 1197,76 | 1026,88 | - | |
| | P6 | 1301,65 | 1198,07 | 1050,98 | 121,60 | |
| | P7 | - | - | - | - | |
| | P8 | - | - | - | - | |
| | P9 | - | - | - | - | |
| | P10 | - | - | - | - | |
| | P11 | - | - | - | - | |
| | 12 | - | - | - | - | T4 °C |
| Hormigón Refractario 200 mm Si-Ca 75 mm Microporoso 25 mm | P13.1 | 804,64 | 1198,80 | 1075,69 | 801,30 | 83,56 |
| | P14 | 854,86 | 1198,73 | 1067,93 | 776,42 | 87,40 |
| | P15 | 828,41 | 1198,77 | 1106,81 | - | - |
| | P16 | 881,73 | 1198,69 | 1100,81 | - | - |
| | P17 | 846,87 | 1198,74 | 1130,99 | - | - |
| | P18 | 902,68 | 1198,66 | 1126,44 | - | - |

De todas estas configuraciones se pueden elegir tanto la 13 como la 14, dependerá principalmente del coste que posteriormente tengan los materiales, pero a la vista de los resultados será mejor opción la configuración 13 puesto que la temperatura es menor a la exigida y el calor perdido menor que el de la configuración 14.

El software con el cual se llevan a cabo las experimentaciones es una demo de SIMUTHERM 6.1.

A continuación se muestra mediante software que se llega prácticamente a los mismos resultados, no se hará para todas las configuraciones anteriormente dadas, sólo se hará para aquellas que son validas, con el fin de ver que los resultados son semejantes.

Datos de la aplicación Configuración P13.1

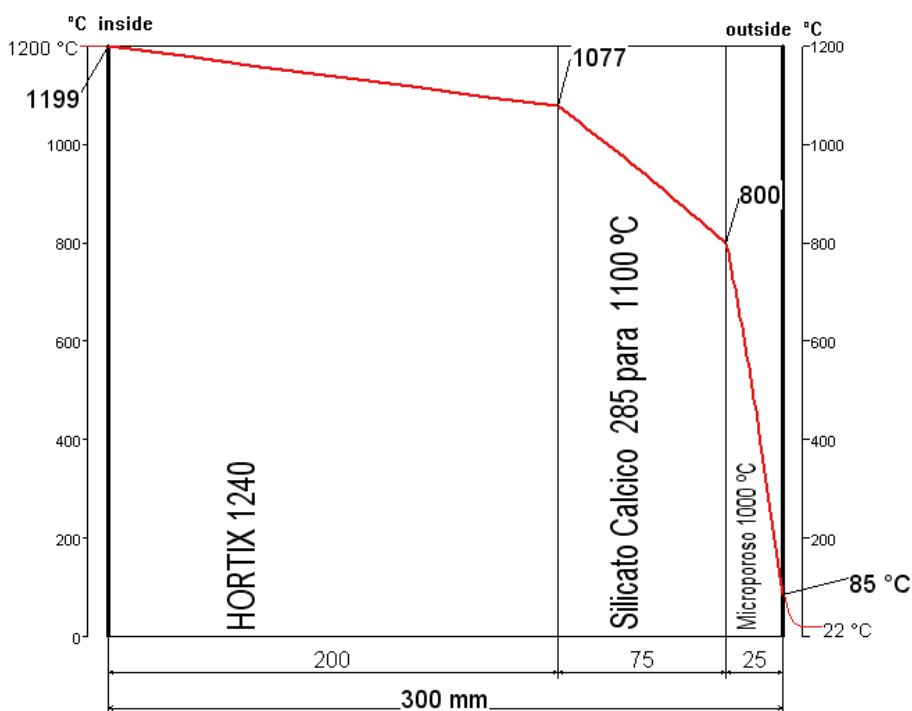
| | | | |
|---|----------|------------|--------------------------------------|
| Geometría: | x plana | cilíndrica | esférica |
| Orientación: | solera | bóveda | x pared |
| | Interior | Exterior | |
| Temperatura (°C) | 1200 | 22 | Base de cálculo (interior): ASTM-680 |
| Coeficiente α (W/m ² K) | 700 | 12.61 | Base de cálculo (exterior): ASTM-680 |
| Fuentes de calor (W/m ²) | -- | -- | Emisividad ϵ interior: - |
| Diámetro (mm) | -- | -- | Emisividad ϵ exterior: - |
| Calor transmitido (W/m ²) | 790.7 | | Velocidad del viento: - |

RESULTADOS

| MATERIAL | ESPESOR (mm) | CALOR ALMACENADO (MJ/m ²) | CONDUCTIVIDAD (W/mK) | TEMPERATURA (°C) | |
|-------------------------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-------------|
| | | | | Media | Superficie |
| Hortix 1240 | 200 | 569.5 | 1.297 | 1138 | 1198.9 |
| SiCa 1100 ^º | 75 | 21.41 | 0.2141 | 941.3 | 1077 |
| Microporoso 1000 ^º | 25 | 2.896 | 0.0266 | 463.3 | 799.6 |
| Total: | 300 | 593.8 | Temperatura de chapa: | | 84.2 |

OBSERVACIONES

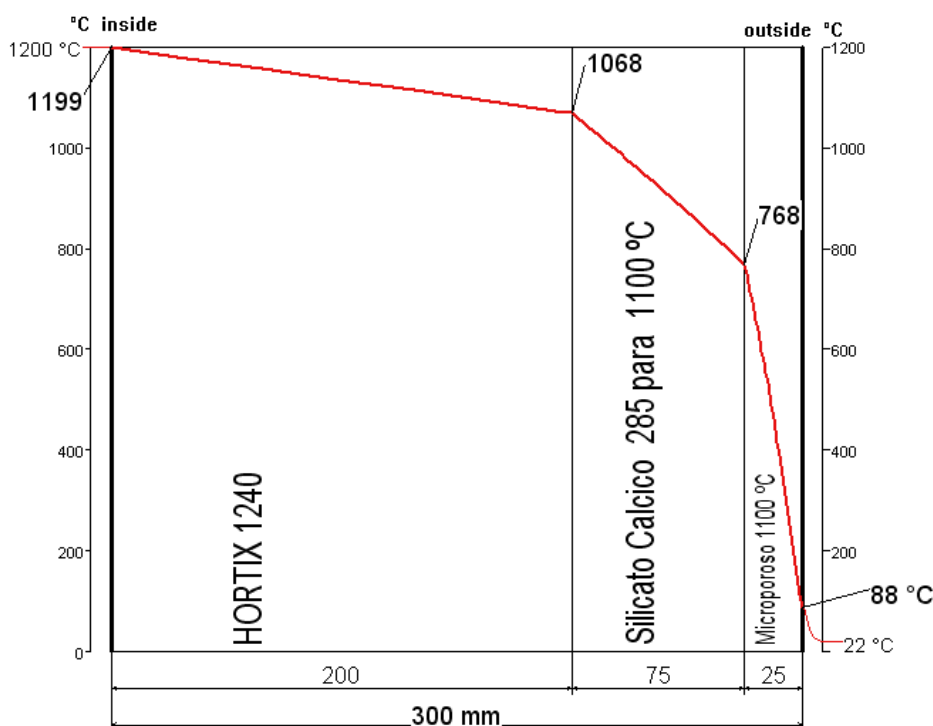
Los resultados son bastante similares a los obtenidos analíticamente.



| Datos de la aplicación Configuración P14 | | | |
|---|----------|------------|--------------------------------------|
| Geometría: | x plana | cilíndrica | esférica |
| Orientación: | solera | bóveda | x pared |
| | Interior | Exterior | |
| Temperatura (°C) | 1200 | 22 | Base de cálculo (interior): ASTM-680 |
| Coeficiente α (W/m ² K) | 700 | 12.81 | Base de cálculo (exterior): ASTM-680 |
| Fuentes de calor (W/m ²) | -- | -- | Emisividad ϵ interior: - |
| Diámetro (mm) | -- | -- | Emisividad ϵ exterior: - |
| Calor transmitido (W/m ²) | 847.7 | | Velocidad del viento: - |

| RESULTADOS | | | | | |
|-------------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------|------------|
| MATERIAL | ESPESOR (mm) | CALOR ALMACENADO (MJ/m ²) | CONDUCTIVIDAD (W/mK) | TEMPERATURA (°C) | |
| | | | | Media | Superficie |
| Hortix 1240 | 200 | 566.9 | 1.297 | 1133.6 | 1198.8 |
| SiCa 285 – 1100° | 75 | 20.89 | 0.2121 | 921.5 | 1068 |
| Microporoso 1100° | 25 | 3.11 | 0.0295 | 450.6 | 767.6 |
| Total: | 300 | 590.9 | Temperatura de chapa: | | 88.2 |

| OBSERVACIONES |
|---|
| Resultados muy semejantes a los obtenidos analíticamente. |



4.3.3 Cálculos de la temperatura en solera:

Condiciones iniciales:

- Temperatura interior $T_i = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura exterior $T_e = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Coeficiente de transferencia térmica interior $h_i = 700\text{ W/m}^2\text{k}$
- Coeficiente de transferencia térmica exterior $h_e = 13\text{ W/m}^2\text{k}$
- Límite del revestimiento 400 mm.
- Importante que el material tenga unas elevadas condiciones mecánicas.

Datos a obtener:

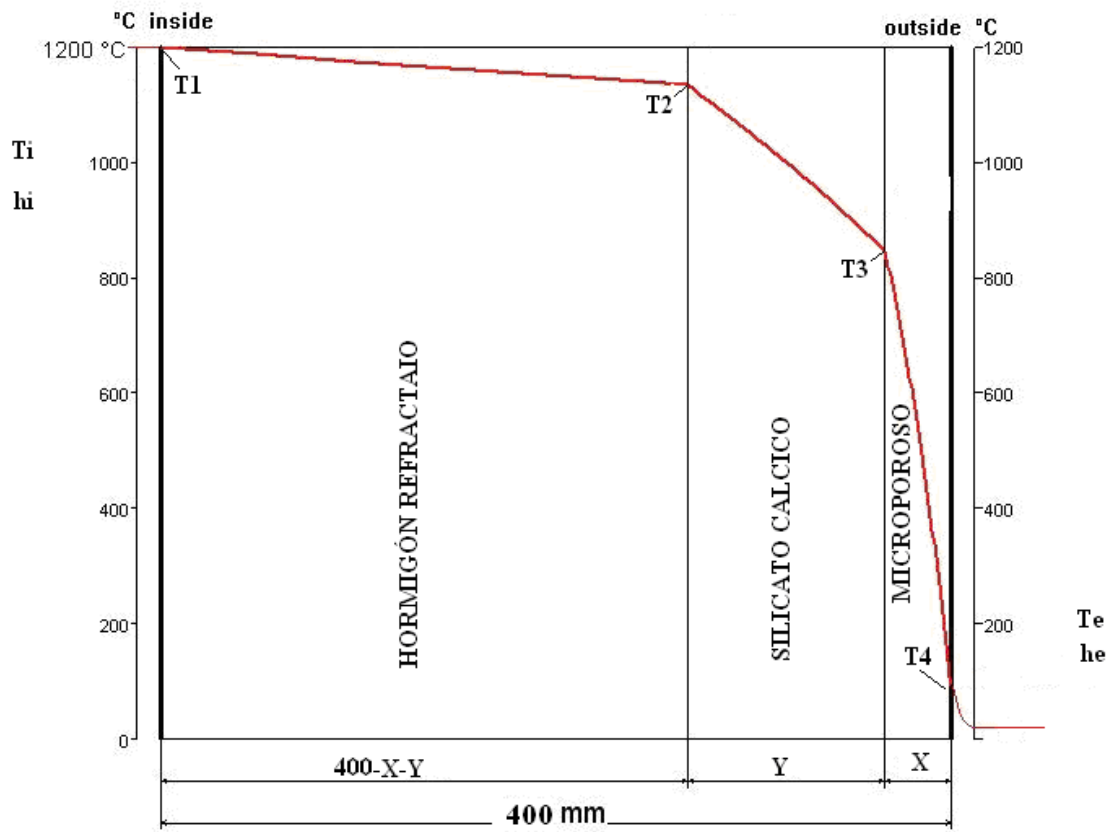
- Flujo de calor \dot{q}
- Temperatura a obtener en chapa $<95^{\circ}\text{C}$

El revestimiento de esta zona es la parte más importante del horno. Es importante que el material refractario que se encuentra en la cara caliente del horno tenga unas propiedades mecánicas muy elevadas.

Si se observa en las tablas de propiedades de los hormigones refractarios, se puede apreciar que el Hortix 1285 es el material que mejores propiedades mecánicas tiene, es por ello que este será el material con el que se trabaje en la primera capa.

Atendiendo a anteriores configuraciones donde estaba presente el Hortix 1285, el silicato cálcico y el microporoso, se llega a la conclusión que para un espesor de 300 mm es una configuración no válida. Pero se ha de probar por un espesor de 400.

Una posible configuración sería la siguiente:



Se prueba aumentando el espesor del hormigón refractario de 200mm a 300 mm

El espesor del SiCa se mantiene en 75 mm

El espesor del microporoso se mantiene también en 25 mm

Se puede estimar que la temperatura media que se da en cada capa es de:

T_{m1} : Temperatura media de la primera capa de trabajo

$$T_{m1} = \frac{T_i + T_1}{2} = \frac{1200^\circ C + 1000^\circ C}{2} = 1100^\circ C$$

T_{m2} : Temperatura media de la segunda capa de trabajo

$$T_{m2} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{1100^\circ C + 900^\circ C}{2} = 1000^\circ C$$

T_{m3} : Temperatura media de la tercera capa de trabajo

$$T_{m3} = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{1000^\circ C + 22^\circ C}{2} = 511^\circ C$$

Los valores de las conductividades en base a la Tabla.1, Tabla.3 y Tabla.4 de los distintos materiales, realizando las interpolaciones pertinentes son:

Hortix 1285 a $1100^\circ C = 2.50 \text{ W/mk}$

$$x = 2.42 + (1100 - 1000) \cdot \frac{(2.58 - 2.42)}{(1200 - 1000)} = 2.5 \text{ W/mk}$$

Silicato cálcico de $1000^\circ C$ a $1000^\circ C =$

No usamos en este caso el SiCa para $1000^\circ C$ puesto que no puede trabajar por encima de su temperatura de trabajo y las condiciones serían muy extremas.

Silicato cálcico de $1100^\circ C$ a $1000^\circ C = 0.22 \text{ W/mk}$

Microporoso de $1000^\circ C$ a $511^\circ C = 0.028 \text{ W/mk}$

$$x = 0.025 + (511 - 400) \cdot \frac{(0.030 - 0.025)}{(600 - 400)} = 0.028 \text{ W/mk}$$

Microporoso de $1100^\circ C$ a $511^\circ C = 0.031 \text{ W/mk}$

$$x = 0.028 + (511 - 400) \cdot \frac{(0.032 - 0.028)}{(600 - 400)} = 0.031 \text{ W/mk}$$

Según (4) el valor de las resistencias térmicas para cada material es:

- Para el Hortix 1285 $R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.3m}{2.50 \text{ W/mk}} = 0.12 \text{ m}^2 \text{ k/W}$
- Para el SiCa $1100^\circ C$ $R_{t2} = \frac{x_2}{k_2} = \frac{0.05m}{0.22 \text{ W/mk}} = 0.227 \text{ m}^2 \text{ k/W}$
- Para el Microporoso $1000^\circ C$ $R_{t3} = \frac{x_3}{k_3} = \frac{0.05m}{0.028 \text{ W/mk}} = 1.785 \text{ m}^2 \text{ k/W}$

- Para el Microporoso 1100° C $R_{t3} = \frac{x_3}{k_3} = \frac{0.05m}{0.031 \frac{W}{mk}} = 1.613 \frac{m^2 k}{W}$

Por tanto el resultado del flujo de calor según (7) y el valor de T_1 , T_2 y T_3 según (5) para esta nueva configuración:

- Configuración S0

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} = 0.00148 + 0.0769 + 0.12 + 0.227 + 1.785 = 2.210 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{2.210 \frac{m^2 k}{W}} = 533.031 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_1 \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 533.031 \frac{W}{m^2} = 1199.21^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1199.21^\circ C - 0.12 \frac{m^2 k}{W} \cdot 533.031 \frac{W}{m^2} = \underline{\underline{1135.86^\circ C}}$$

Se aprecia que la temperatura T_2 que corresponde al silicato cálcico no cumple con ser menor de 1100°C.

Las posibles soluciones que se pueden dar para poder hacer un revestimiento y que este cumpla con todas las condiciones pueden ser:

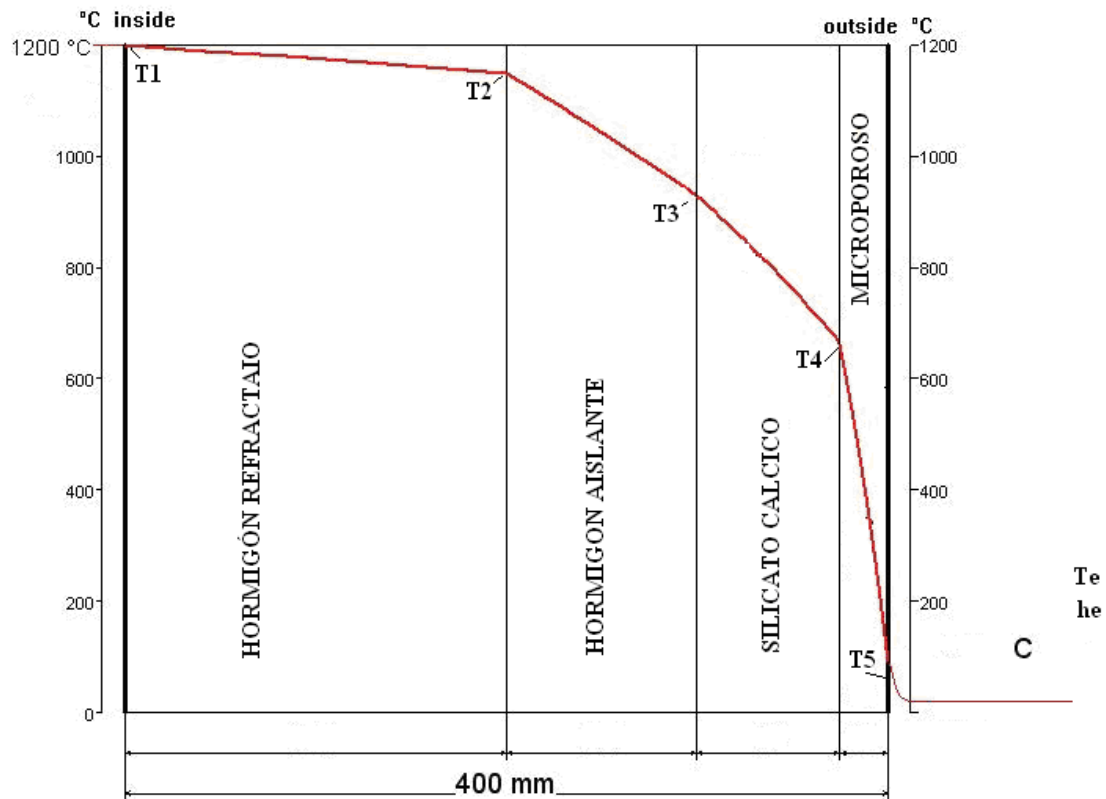
- Reducir el espesor de hormigón refractario.
- Aumentar el espesor tanto del SiCa como del microporoso.
- Incorporar un nuevo material.

Par evitar tener que volver a realizar numerosos cálculos cambiando espesores de hormigón refractario y de los paneles aislantes, se opta por poner un material intermedio entre el hormigón refractario y el SiCa.

Este nuevo material ha de ser un material que aísle bastante temperatura y a su vez que tenga buenas propiedades mecánicas. Algunos de estos tipos de materiales pueden ser los que se recogen en la Tabla.2 y pertenecen a la familia de los hormigones aislantes.

Cabe mencionar que tanto hormigones refractarios como los aislantes tienen un espesor mínimo de uso, que ronda los 100 mm

Una configuración aproximada de cómo quedaría sería:



De todos los hormigones aislantes de los que se dispone, se usarán los que me mejores resistencia mecánica tengan, es decir, se usarán el Horlite 1000 y el Horlite 1.2.4 B

Por tanto se pueden dar las siguientes configuraciones:

| | CONFIGURACIONES | | | |
|-------------------|-----------------|----|----|----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 |
| Hortix 1285 | x | x | x | x |
| Horlite 1000 | x | x | | |
| Horlite 1.2.4. B | | | x | x |
| SiCa- 1100º | x | x | x | x |
| Microporoso 1000º | x | | x | |
| Microporoso 1100º | | x | | x |

El proceso de cálculo es idéntico a los anteriores. Lo primero es definir los espesores de las capas:

Hormigón refractario = 200 mm

Hormigón aislante = 100 mm

Silicato Cálcico = 75 mm

Microporoso = 25 mm

Se estima que la temperatura media de cada capa será:

T_{m1} : Temperatura media de la primera capa de trabajo

$$T_{m1} = \frac{T_i + T_1}{2} = \frac{1200^\circ C + 1000^\circ C}{2} = 1100^\circ C$$

T_{m2} : Temperatura media de la segunda capa de trabajo

$$T_{m2} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{1100^\circ C + 900^\circ C}{2} = 1000^\circ C$$

T_{m3} : Temperatura media de la tercera capa de trabajo

$$T_{m3} = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{1000^\circ C + 600^\circ C}{2} = 800^\circ C$$

T_{m4} : Temperatura media de la tercera capa de trabajo

$$T_{m4} = \frac{T_4 + T_3}{2} = \frac{600^\circ C + 22^\circ C}{2} = 311^\circ C$$

Una vez conocidas las temperaturas medias de las capas se busca el valor de las conductividades, realizando iteraciones donde sea necesario, para ello se usan: Tabla.1, Tabla.2, Tabla.3, Tabla.4 y Tabla.5.

Las conductividades son:

Hortix 1285 a $1100^\circ C = 2.50 \text{ W/mk}$

$$x = 2.42 + (1100 - 1000) \cdot \frac{(2.58 - 2.42)}{(1200 - 1000)} = 2.5 \text{ W/mk}$$

Horlite 1000 a $1000^\circ C = 0.27 \text{ W/mk}$

Horlite 1.2.4 B a $1000^\circ C = 0.25 \text{ W/mk}$

Silicato cálcico de $1000^\circ C$ a $800^\circ C =$

No usamos en este caso el SiCa para $1000^\circ C$, puesto que el silicato cálcico par $1100^\circ C$ tiene mejores propiedades.

Silicato cálcico de 1100°C a 800 °C= 0.20 W/mk

Microporoso de 1000°C a 310 °C= 0.025 W/mk

Microporoso de 1100°C a 310 °C= 0.028 W/mk

Según (4)

- Para el Hortix 1285 $R_{t1} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.2m}{2.50 \frac{W}{mk}} = 0.080 m^2 k/W$
- Para el Horlite 1000 $R_{t2} = \frac{x_1}{k_1} = \frac{0.1m}{0.27 \frac{W}{mk}} = 0.370 m^2 k/W$
- Para el Horlite 1.2.4 B $R_{t2} = \frac{x_2}{k_2} = \frac{0.1m}{0.25 \frac{W}{mk}} = 0.400 m^2 k/W$
- Para el SiCa 1100° C $R_{t3} = \frac{x_3}{k_3} = \frac{0.075m}{0.20 \frac{W}{mk}} = 0.375 m^2 k/W$
- Para el Microporoso 1000° C $R_{t4} = \frac{x_4}{k_4} = \frac{0.025m}{0.025 \frac{W}{mk}} = 1.0 m^2 k/W$
- Para el Microporoso 1100° C $R_{t4} = \frac{x_4}{k_4} = \frac{0.025m}{0.028 \frac{W}{mk}} = 0.892 m^2 k/W$

El resultado del flujo de calor según (7) y el valor de T1, T2, T3 y T4 según (5) para cada una de las configuraciones es:

- Configuración S1

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4} = 0.00148 + 0.0769 + 0.080 + 0.37 + 0.375 + 1 = 1.903 m^2 k/W$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.903 m^2 k/W} = 619.02 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_{t1} \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 619.02 \frac{W}{m^2} = 1199.08^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_{t2} \cdot \dot{q} = 1199.08^\circ C - 0.080 \frac{m^2 k}{W} \cdot 619.02 \frac{W}{m^2} = 1149.55^\circ C$$

$$T_3 = T_2 - R_{t3} \cdot \dot{q} = 1149.55^\circ C - 0.37 \frac{m^2 k}{W} \cdot 619.02 \frac{W}{m^2} = 920.51^\circ C$$

$$T_4 = T_3 - R_{t4} \cdot \dot{q} = 920.51^\circ C - 0.375 \frac{m^2 k}{W} \cdot 619.02 \frac{W}{m^2} = 688.37^\circ C$$

$$T_5 = T_4 - R_{t5} \cdot \dot{q} = 688.37^\circ C - 1 \frac{m^2 k}{W} \cdot 619.02 \frac{W}{m^2} = 69.35^\circ C$$

• Configuración S2

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4} = 0.00148 + 0.0769 + 0.080 + 0.37 + 0.375 + 0.892 = 1.795 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.795 \frac{m^2 k}{W}} = 656.26 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_{t1} \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 656.26 \frac{W}{m^2} = 1199.02^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_{t2} \cdot \dot{q} = 1199.02^\circ C - 0.080 \frac{m^2 k}{W} \cdot 656.26 \frac{W}{m^2} = 1146.51^\circ C$$

$$T_3 = T_2 - R_{t3} \cdot \dot{q} = 1146.51^\circ C - 0.370 \frac{m^2 k}{W} \cdot 656.26 \frac{W}{m^2} = 903.69^\circ C$$

$$T_4 = T_3 - R_{t4} \cdot \dot{q} = 903.69^\circ C - 0.375 \frac{m^2 k}{W} \cdot 656.26 \frac{W}{m^2} = 657.59^\circ C$$

$$T_5 = T_4 - R_{t5} \cdot \dot{q} = 657.59^\circ C - 0.892 \frac{m^2 k}{W} \cdot 656.26 \frac{W}{m^2} = 72.2^\circ C$$

• Configuración S3

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4} = 0.00148 + 0.0769 + 0.080 + 0.4 + 0.375 + 1 = 1.933 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.933 \frac{m^2 k}{W}} = 609.41 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 609.41 \frac{W}{m^2} = 1199.09^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1199.09^\circ C - 0.080 \frac{m^2 k}{W} \cdot 609.41 \frac{W}{m^2} = 1150.33^\circ C$$

$$T_3 = T_2 - R_2 \cdot \dot{q} = 1150.33^\circ C - 0.400 \frac{m^2 k}{W} \cdot 609.41 \frac{W}{m^2} = 906.56^\circ C$$

$$T_4 = T_3 - R_3 \cdot \dot{q} = 906.56^\circ C - 0.375 \frac{m^2 k}{W} \cdot 609.41 \frac{W}{m^2} = 678.03^\circ C$$

$$T_5 = T_4 - R_4 \cdot \dot{q} = 678.03^\circ C - 1 \frac{m^2 k}{W} \cdot 609.41 \frac{W}{m^2} = 68.62^\circ C$$

• Configuración S4

$$R_{teq} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4} = 0.00148 + 0.0769 + 0.080 + 0.4 + 0.375 + 0.892 = 1.825 \frac{m^2 k}{W}$$

$$T_i - T_e = \dot{q} \cdot R_{teq} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{teq}} = \frac{1200^\circ C - 22^\circ C}{1.825 \frac{m^2 k}{W}} = 645.47 \frac{W}{m^2}$$

$$T_n - T_{n+1} = \dot{q} \cdot R_n$$

$$T_1 = T_i - R_i \cdot \dot{q} = 1200^\circ C - 0.00148 \frac{m^2 k}{W} \cdot 645.47 \frac{W}{m^2} = 1199.04^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - R_1 \cdot \dot{q} = 1199.04^\circ C - 0.080 \frac{m^2 k}{W} \cdot 645.47 \frac{W}{m^2} = 1147.39^\circ C$$

$$T_3 = T_2 - R_2 \cdot \dot{q} = 1147.39^\circ C - 0.400 \frac{m^2 k}{W} \cdot 645.47 \frac{W}{m^2} = 889.16^\circ C$$

$$T_4 = T_3 - R_3 \cdot \dot{q} = 889.16^\circ C - 0.375 \frac{m^2 k}{W} \cdot 645.47 \frac{W}{m^2} = 647.07^\circ C$$

$$T_5 = T_4 - R_4 \cdot \dot{q} = 647.07^\circ C - 0.892 \frac{m^2 k}{W} \cdot 645.47 \frac{W}{m^2} = 71.22^\circ C$$

Tabla resumen de resultados:

| Espesores de capas | Configuraciones | Flujo de calor W/m2 | T1 °C | T2 °C | T3 °C | T4 °C | T5 °C |
|----------------------------|-----------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Hormigón Refractario 200mm | S0 | 533.031 | 1199.21 | 1135.86 | - | - | - |
| Hormigón aislante 200mm | S1 | 619.02 | 1199.08 | 1149.55 | 920.51 | 688.37 | 69.35 |
| Si-Ca 75 mm | S2 | 656.26 | 1199.02 | 1146.51 | 903.69 | 657.59 | 72.2 |
| Microporoso 25 mm | S3 | 609.41 | 1199.09 | 1150.33 | 906.56 | 678.03 | 68.62 |
| | S4 | 645.47 | 1199.04 | 1147.39 | 889.16 | 647.07 | 71.22 |

Cualquiera de las configuraciones de la 1 a la 4 pueden ser totalmente válidas par el revestimiento de la solera, pero si se ha de tener en cuenta las propiedades mecánicas del material la elección será la configuración que posea el Horlite 1.2.4 B ya que presenta mejores condiciones.

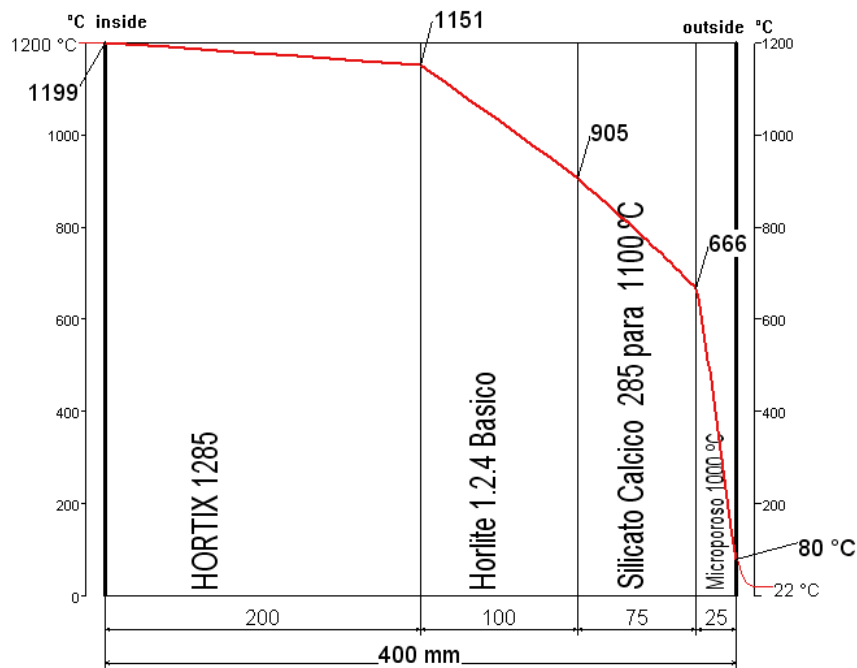
De las dos configuraciones que quedan S3 y S4 donde está presente el Horlite 1.2.4 B se puede optar por ambas, pero dependerá en gran medida del coste que tenga cada uno de los productos que la conforman, es decir, el coste de un material microporoso a 1000°C no es lo mismo que para 1100°C.

A continuación se muestra un ejemplo de los datos obtenidos mediante el software iterativo con el fin de compara los resultados obtenidos, se harán en base solo a las configuraciones que poseen el hormigón aislante Horlite 1.2.4 B

| Datos de la aplicación Configuración S3 | | | |
|---|----------|------------|--------------------------------------|
| Geometría: | x plana | cilíndrica | esférica |
| Orientación: | x solera | bóveda | pared |
| | Interior | Exterior | |
| Temperatura (°C) | 1200 | 22 | Base de cálculo (interior): ASTM-680 |
| Coeficiente α (W/m ² K) | 700 | 10.69 | Base de cálculo (exterior): ASTM-680 |
| Fuentes de calor (W/m ²) | -- | -- | Emisividad € interior: - |
| Diámetro (mm) | -- | -- | Emisividad € exterior: - |
| Calor transmitido (W/m ²) | 620.4 | | Velocidad del viento: - |

| RESULTADOS | | | | | |
|-------------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------|------------|
| MATERIAL | ESPESOR (mm) | CALOR ALMACENADO (MJ/m ²) | CONDUCTIVIDAD (W/mK) | TEMPERATURA (°C) Media | Superficie |
| Hortix 1285 | 200 | 735.4 | 2.56 | 1174.9 | 1199.1 |
| Horlite 1.2.4 –B | 100 | 116.7 | 0.2522 | 1029.1 | 1150.6 |
| SiCa 1100° | 75 | 17.43 | 0.1978 | 788.9 | 904.5 |
| Microporoso 1000° | 25 | 2.3.07 | 0.025 | 384.2 | 665.6 |
| Total: | 400 | 871.8 | Temperatura de chapa: | | 80 |

| OBSERVACIONES |
|--|
| - La diferencia de grados que da calculando por medio del software y analíticamente es considerable, pero en ambos casos vale y estaría dentro de los límites fijados. |



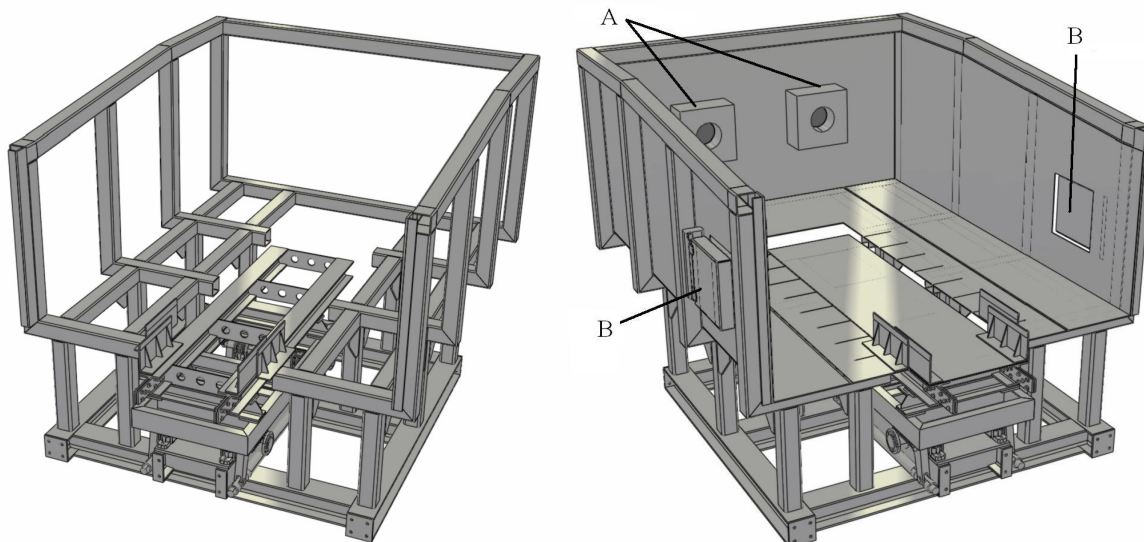
5. Diseño del revestimiento en función de cálculos de transferencia de calor.

En el diseño del horno de solera galopante intervienen tanto la empresa encargada de la estructura del horno y sus accionamientos como la empresa encargada del revestimiento refractario.

En esta parte del proyecto solo se tiene en cuenta el diseño del revestimiento refractario atendiendo a las necesidades requeridas. Se han de tener en cuenta los cálculos térmicos realizados anteriormente para poder definir bien las distintas capas con las que vamos a revestir el horno. Es muy importante partir de un diseño de la parte metálica para poder ir acoplando nuestros materiales en la medida de lo posible. Esta estructura metálica que va a venir suministrada por el cliente o bien por un tercero

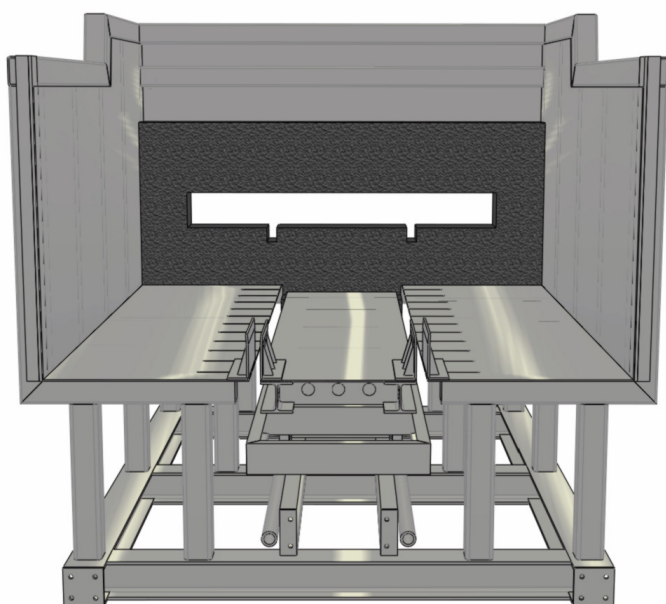
Debido a las elevadas dimensiones del horno solo se visionará una parte del horno para que se tenga una visión general de cómo queda la sección del mismo.

Partiendo de la estructura enviada o bien por el cliente o como en este caso un tercero que es el encargado de la parte metálica y sistemas eléctricos del horno.



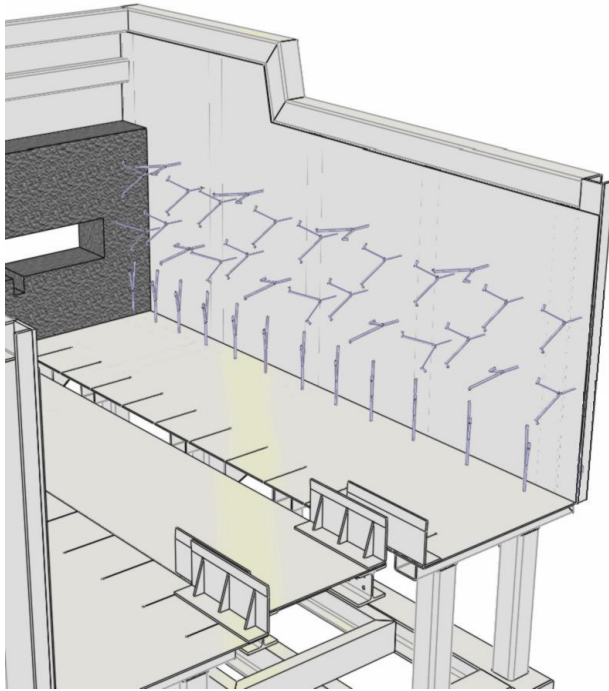
Se aprecia como será la estructura del horno y las zona donde van alojados los quemadores (A) y las puertas o mirillas (B).

El primer paso es poner el hormigón de la entrada del horno por donde tendrá lugar la entrada de la palanquilla.



El hueco que se ve en la imagen es el que ha de quedar como mínimo para que la palanquilla no tenga problemas de acceso.

Para poder sujetar el hormigón de las paredes se han de colocar unos anclajes, que no serían necesarios pero a petición del cliente se ponen para que se eviten problemas.

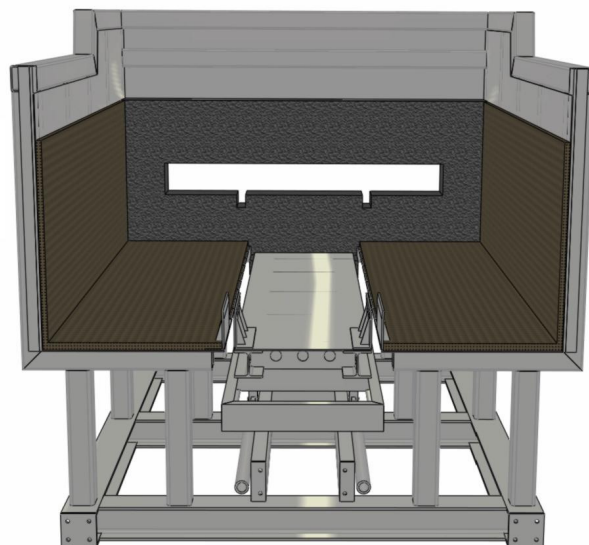


Estos tipos de anclajes constan de una barra vertical que va roscada a la parte exterior de la chapa, y la parte que se ve con forma de “V”, (y va roscada a la barra vertical), es la que esta en contacto con el hormigón.

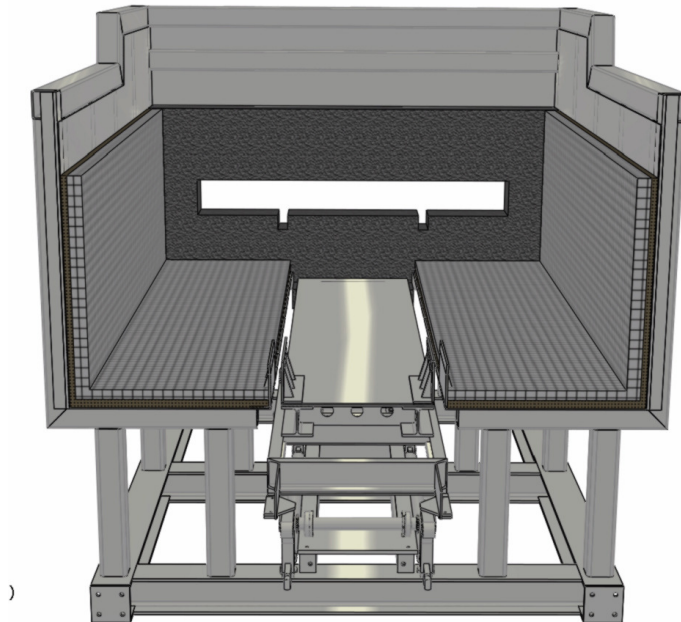
Tanto en la pared como en la base de los laterales.

En las fotos siguientes no se verán representados los anclajes debido a que entorpecen la vista de los materiales.

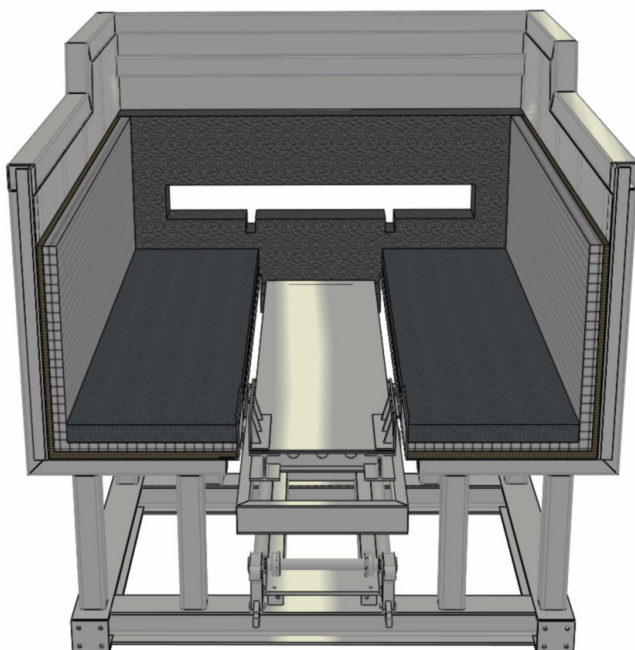
Una vez colocado el frontal, se empiezan a colocar las bases de las partes fijas, tanto base como paredes y una vez terminadas se colocara la parte central que corresponde al galopante.



Seguidamente se coloca la siguiente capa de material, en este caso de silicato cálcico.
75mm en la base y 75 en las paredes.



Ya estarían cocados los materiales aislantes que son los que reducirán bastante las temperaturas.
Ahora se procede a colocar la capa de hormigón, primero en la parte de la base y posteriormente en las paredes.

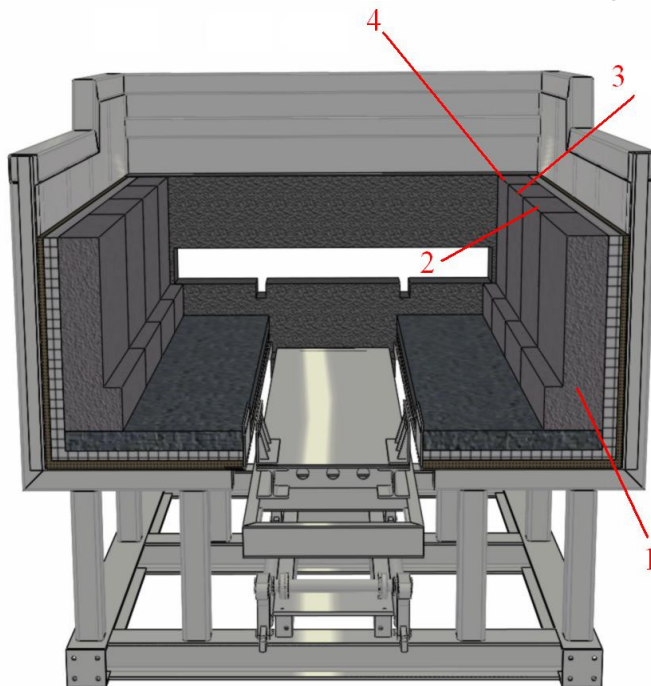


Una vez que se coloquen las paredes, se procederá a colocar la parte central del horno, la que corresponderá al galopante en sí.

El motivo de esto es que primero se hace un lateral, el cual se deja secar y posteriormente nos vamos al otro, mientras este último se va fraguando se hace la parte central pudiendo pisar la primera que se

hizo puesto que ya estaría seca.

Se empieza a encofrar las paredes y se vierte el material refractario en este caso a diferencia del anterior que era un material aislante.

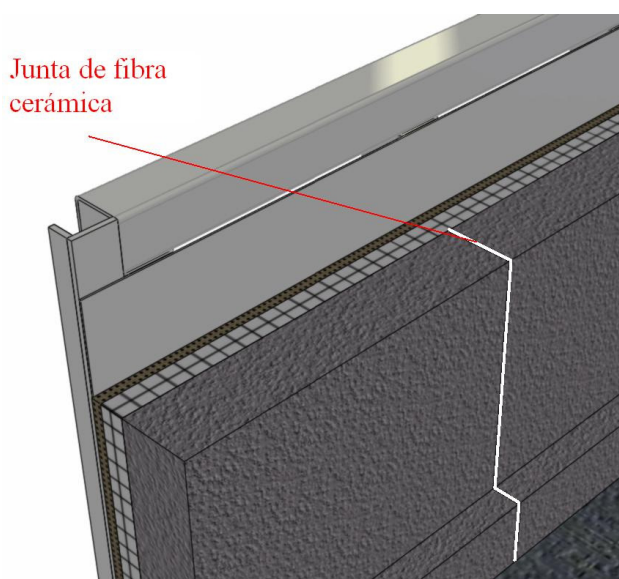


El proceso para poder montar las paredes, sería hacer primero las partes, 1 y 3 con el fin de que cuando se hagan la 2 y la 4 nos quede una junta de dilatación tal que nos permita que el material no choque y se fracture cuando este trabajando.

El proceso sería, hacer el 1 y el 3 esperar que fragüe, desencofrar y hacer el 2 y el 4

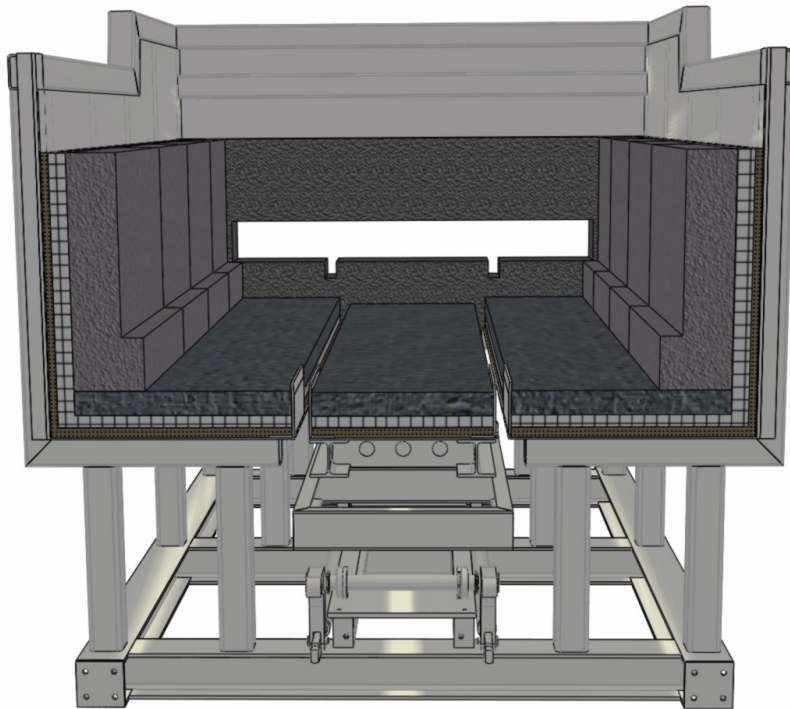
poniendo entre ellos una capa de material aislante tal como una plancha de fibra cerámica.

De manera que quedaría una junta tal y como vemos en la siguiente imagen.



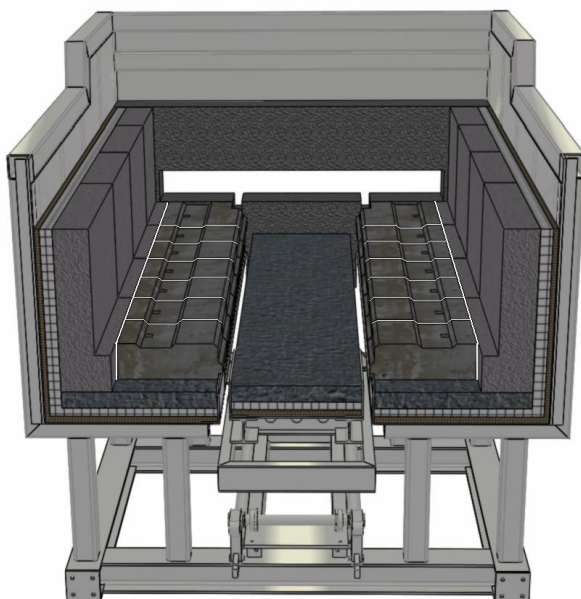
La junta de fibra cerámica ha de ser de un tamaño tal que sea suficiente para absorber las dilataciones del material. No se puede dejar una junta, por ejemplo de 2mm ya que el material chocaría y se rompería. Por tanto la junta irá en función de las propiedades que tenga cada material. En este caso con una junta de unos 10mm el material no rompería.

Se coloca entonces la parte que corresponde al galopante, de igual manera que los anteriores, primero el microporoso, luego el silicato y por ultimo el hormigón aislante.



Ya se puede empezar a colocar la parte mas importante del horno, que son las piedras que van a ser las que van a sufrir más en cuanto a temperatura, golpes, etc.

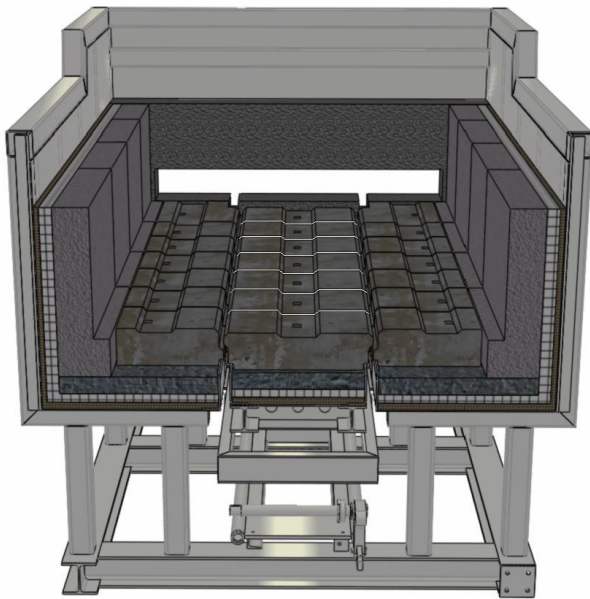
El proceso para colocar la piedras, será: primero se coloca un lateral, posteriormente el otro y por último se deja el de la parte central.



Se puede apreciar que entre las piedras que forman los laterales de la base hay juntas de fibra cerámica para evitar el choque entre ellas.

El motivo de poner fibra cerámica entre los laterales y las piedras es para que a la hora de hacer el agujero que sujete a las piedras no coincida con el circuito

interno de agua que lleva el horno.

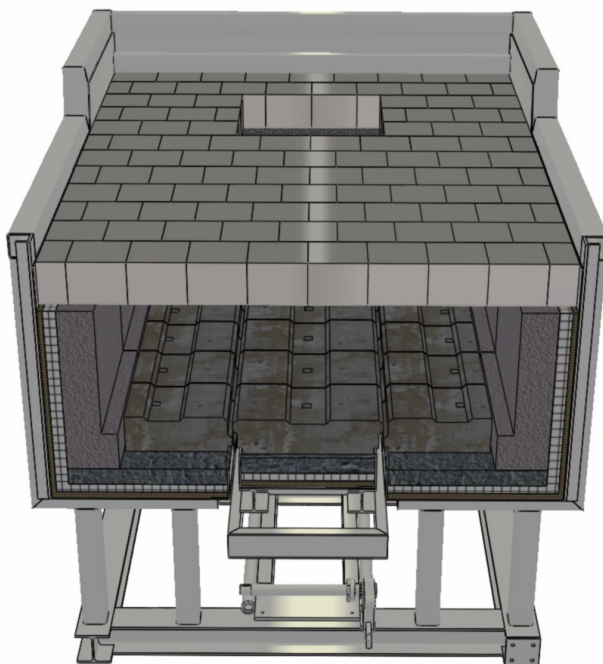


En las piedras del galopante también se han de poner juntas de fibra cerámica, por el mismo motivo que los anteriores.

Tanto en las piedras laterales como en las del galopante que hay una especie de cuadrado, eso tiene como fin sujetar la piedra a la base del horno, de tal manera que pasamos un anclaje especial el cual

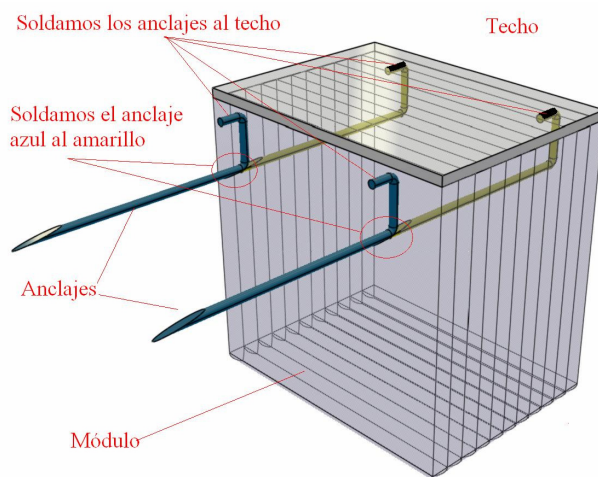
ira roscado por la parte de debajo del horno, pero eso se muestra más adelante

Una vez que se tiene todo lo anterior montado se procede a la colocación del techo con los módulos de fibra cerámica, quedando el horno de la siguiente manera:



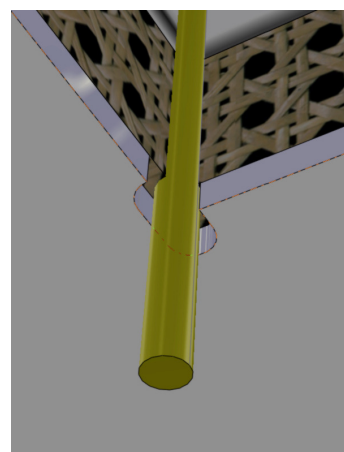
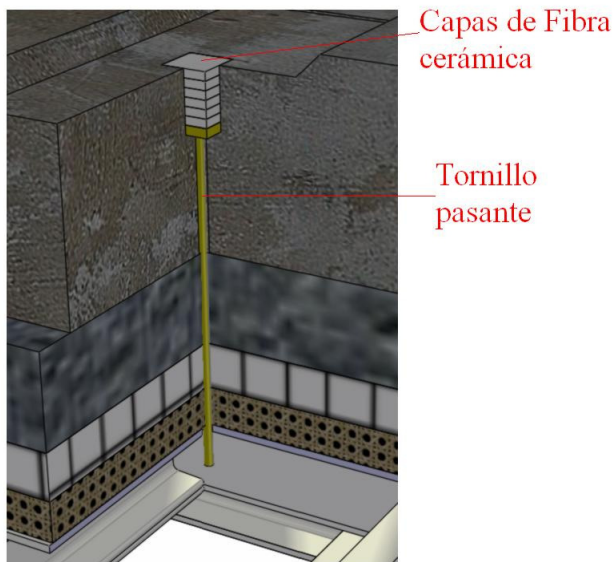
La forma de colocar los módulos es de una manera intercalada, sirve para romper de alguna manera el puente térmico, es decir que no se genere calor de una manera continua a lo largo del horno.

Los módulos van anclados por medio de dos anclajes cada uno con forma de L y el proceso de este montaje es de la siguiente manera;



El proceso sería repetir continuamente esto, es decir, soldar anclaje, pinchar el módulo, soldar los nuevos anclajes a los que sujetan el módulo, y volver a pinchar otro módulo. Habría que repetir el proceso una y otra vez.

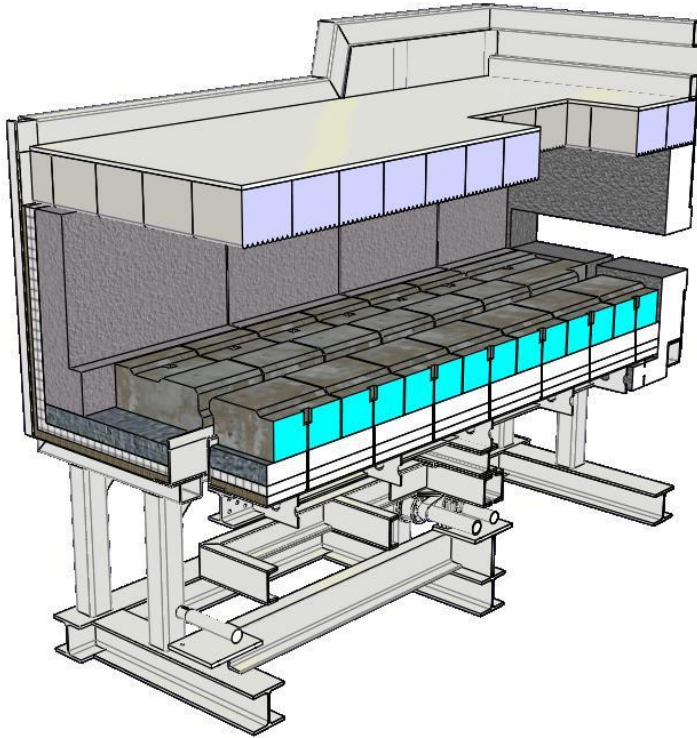
La manera de fijar las piedras a la base del horno:



En estas fotos se puede apreciar la manera de fijar las piedras a la base del horno y como se han de tapar para que el pasador no sufra desgaste con la temperatura.

En la foto de la derecha se puede ver que hay un agujero abocardado con el fin de que hay holgura entre el tornillo pasante y la chapa, permitiendo solo el movimiento de manera longitudinal.

A continuación se muestra el horno seccionado donde se pueden distinguir todas sus capas



6. Fabricación y montaje del revestimiento:

6.1 Moldes previos para la fabricación de las piezas que irán en el horno.



Fabricación de los moldes para poder realizar las piezas que Irán en contacto con la palanquilla



Detalle del agujero que ira en la pieza para poder anclarla a la estructura del horno.

Piezas de la solera



Piezas de la solera móvil y útil para su manipulación,
Las piezas están sin darles tratamiento de ahí su color grisáceo.
Una vez se le de el tratamiento térmico a una determinada temperatura, su color se volverá mas claro.



Pieza de la solera, la cual se coloca en la parte fija.
El hueco que se ve en ambas piezas tiene por objeto recoger la escoria que se va almacenando, y también permite que la palanquilla no se quede atrancada.

6.2 Procesos para la fabricación del revestimiento. Y verificación del montaje de los materiales.



En esta foto se puede apreciar tanto las partes fijas de las que se compone el horno como la parte móvil, la cual se encuentra en el centro.

Vemos la boca de entrada de la palanquilla y parte del techo.



Detalle de los quemadores que van en la primera fase del calentamiento de la palanquilla.



Inicio de los revestimientos de las paredes y de las partes fijas a expensas de colocarlas piezas preformadas.



Detalle de la puerta de acceso al horno para posibles reparaciones.

Se pueden apreciar las juntas de dilatación cada metro más o menos.



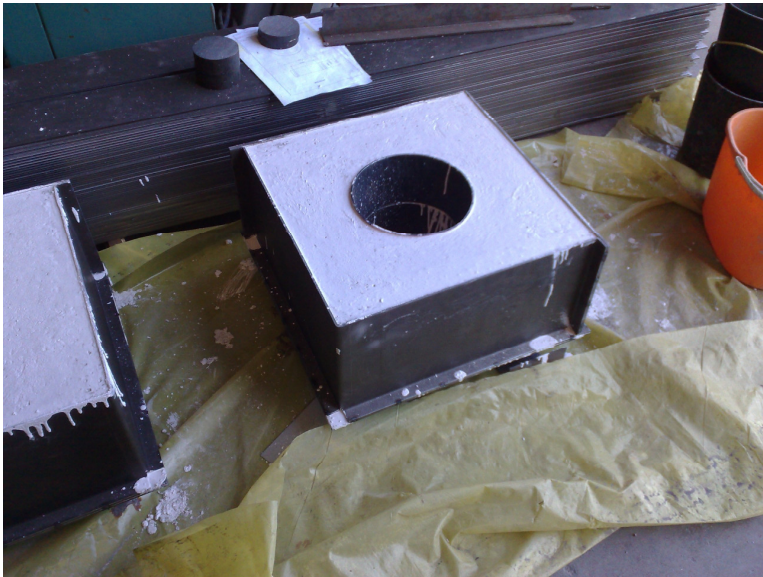
Aquí se puede observar tanto las juntas horizontales como las juntas verticales de dilatación.



Entrada de la palanquilla para recalentamiento. Se ven la parte de la solera, paredes y frontal de entrada.



Detalle del revestimiento en la parte de la entrada del material.



Moldeado de las muflas para los quemadores, el cual es un hormigón resistente a la abrasión y aguanta elevadas temperaturas.



En esta imagen se puede observar el fondo del horno donde van acoplados los quemadores y revestidos por medio de manta de fibra cerámica.

También se ve a los montadores echando una pequeña capa de 1 o 2 centímetros sobre el hormigón aislante con el fin de tapar irregularidades y allanar en la medida de lo posible la superficie para poder poner las piedras encima.



Se puede observar que la viscosidad que tiene este hormigón es muy poca, podría dar a pensar que es un material autocolable, pero no, es un hormigón aislante lo único que a la hora de su mezcla se le ha añadido una mayor proporción de agua con el fin de que no fraguara muy rápido y así poder manipularlo.



En esta imagen se pueden ver las dos zonas donde van los quemadores que posteriormente irán recubiertos de fibra cerámica. Estos quemadores son los primeros que van a calentar la palanquilla de acero.



En esta imagen se ven los quemadores de la parte final del horno ya recubiertos con fibra cerámica. También si nos fijamos en la parte inferior izquierda vemos una especie de puerta, eso es el hueco o agujero por donde sale la palanquilla ya tratada térmicamente.



Esta es la primera piedra que se monta del horno, el montaje se realiza desde la parte final hacia el principio, dejando por hacer las piezas de salida de la palanquilla.



En la imagen anterior vemos que hay una pequeña capa de fibra cerámica, esta es colocada para absorber dilataciones tanto del material de la pared como de la propia piedra.

En el proceso de la colocación de las piezas de la parte fija, se puede observar que a parte de la junta de dilatación que hemos colocación con la pared, también tenemos que colocar una junta de dilatación entre piezas, con el mismo fin que el anterior, evitando así dilataciones del material.





Una vez colocadas las piezas fijas de los laterales procedemos a colocar las piezas de la parte móvil.

El proceso es a la inversa que las partes fijas, es decir comenzamos desde el principio del horno hacia el final.



Al igual que en las partes fijas a qui también colocamos junta de fibra cerámica para absorber las dilataciones.

El motivo por el cual empezamos en este caso por el principio es debido a que la ultima pieza no se debe de hacer hasta que este el resto

montado, puesto que es una pieza muy especial y siempre correrá por cuenta del cliente aunque la podríamos hacer pero se elevaría bastante el precio.

Como vemos en la foto tampoco se hace la última pieza de las partes fijas, es debido a que a la hora del montaje se pueden dar variaciones en las medidas y si tenemos una pieza más grande que el hueco el tener que cortarla supone un alto coste.



En esta imagen podemos observar como se van colocando las piezas de la solera móvil, por medio de unos tablones y una transpaleta se van llevado hasta su posición.

También se puede observar el revestimiento que tienen las paredes, se ha de tener en cuenta que cuando se ponga el techo encima de estas se ha de poner una capa de fibra cerámica para evitar fugas y conseguir un ajuste perfecto.



Esta imagen es un detalle del perfil de la pieza de la solera móvil y la parte fija.



En esta imagen podemos apreciar tanto las piezas de la solera como los laterales y frontales de los quemadores.

Se pueden observar tanto las juntas entre piezas como los huecos de los sistemas de anclajes para fijar a la estructura del horno.



Bueno aquí podemos ver el horno prácticamente acabado a expensas de poner la ultima pieza al final del horno que es por donde sale la palanquilla, y el también faltaría el techo.



Esto es el techo que se monta fuera del horno y luego se acopla, va con módulos de fibra cerámica de densidad 240 kg/m².



Podemos observar el techo ya montado e incluso se ve el color distinto que han tomado las paredes, eso es debido a que se les han hecho un secado controlado. Es por ello que tiene en la parte central de la foto unos termopares para poder seguir de forma controlada la temperatura a la que se ha realizado el secado.



Esta es otra toma para ver como queda el techo del horno desde otra perspectiva.



En esta imagen que es prácticamente parecida a la anterior, pero se puede apreciar al final como hay una palanquilla la cual se ha puesto para comprobar el funcionamiento del horno.



más resistente.

Esta imagen corresponde al final del horno y se puede apreciar como descansa la palanquilla para poder darle salida al tren de laminación, mediante un pistón. Esta pieza final es realizada por el cliente y lleva un contenido en fibras metálicas elevado que hace que la pieza sea

En esta toma vemos como se fijan las piezas de hormigón preformado a la estructura del horno.



El hueco que tienen las piezas ha de coincidir con la ranura que hay en la base el horno, puesto que si no es así podríamos dañar el circuito interno de refrigeración que lleva el horno y entonces el trabajo realizado no valdría para nada puesto que habría que desmontar toda la solera, hay que tener especial cuidado a la hora de hacer los taladros.

En los laterales disponemos de una ranura par poder parar el tornillo, pero en la parte central no hay ranura por lo que habrá que tener especial cuidado a la hora de realizar los agujeros.

7. Conclusiones

Como conclusión de este proyecto se puede decir que en el siglo que vivimos tenemos al alcance de nuestras manos software especializado en cada una de las materias de la vida, y con ello podemos hacer que la resolución de problemas sea mucho más efectiva y rápida, siempre y cuando se tengan unos conocimientos sobre lo que se está trabajando.

Existen infinidad de materiales refractarios de los que para la realización del proyecto se podían haber elegido, pero el cálculo se habría hecho muy extenso, solo se han recogido algunos de estos tipos, que pueden ser a los que más utilización se les da dentro de la industria.

Esta elección de los materiales que hemos realizado durante el estudio de este equipo han sido los adecuados y vemos que tanto analizando analíticamente como mediante software llegamos prácticamente a las mismas soluciones, aunque con más exactitud con este último.

Durante el estudio del proyecto se ha intentado plasmar mediante el diseño como tendría que quedar el horno una vez terminado, y el resultado es satisfactorio, tal y como se puede comprobar viendo las fotos de la instalación por medio de los operarios en obra.

Es importante mencionar que no todo sale como se espera en un primer momento y surgen complicaciones que se han de resolver in situ donde se este trabajando.

En cuanto al horno en si cabe mencionar que a día de hoy se encuentra trabajando satisfactoriamente en un pequeño pueblo de Portugal, que se encuentra en la siguiente dirección:
TRAVESSA IND VIEIRA LEIRIA, VIEIRA DE LEIRIA, LEIRIA, 2430,
Portugal, +351 244 698 120

8. BIBLIOGRAFIA

- TECHNOLOGY OF MONOLITHIC REFRACTORIES. - Plibrico
- REFRACTORY ENGINEERING. - Vulkan-Verlag Essen
- REFRACTORY MATERIAL. - Vulkan-Verlag Essen
- REFRACTORY MANUAL.- American foundrymen's society. Inc
- REVESTIMIENTOS REFRACTARIOS EN HORNOS INDUSTRIALES -Temas Cadem

9. TABLAS DE PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

TABLA 1. PROPIEDADES HORMIGONES REFRACTARIOS

| Nombre del producto | Materia prima base | Tª máxima de trabajo | Análisis químico | | | | Densidad aparente | | Cambio lineal permanente | Resistencia a la compresión en frío | | | Conductividad térmica | | | |
|---------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|-----|---------|---------|-------------------|---------|--------------------------|-------------------------------------|---------|---------|-----------------------|---------|--------|---------|
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | (% , base calcinada) | | | | En seco | 1200 °C | | 1200 °C | 110 °C | 800 °C | 1200 °C | 200 °C | 600 °C | 1000 °C |
| (°C) | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | CaO | (g/cm³) | (g/cm³) | (%) | (MPa) | (MPa) | (Mpa) | (W/m²K) | (W/m²K) | (W/m²K) | (W/m²K) | | |
| HORTIX 1240 | Chamota | 1450 | 45 | 48 | 1,3 | 1,2 | 2,25 | 2,15 | -0,30 | 50 | 60 | 60 | 1,25 | 1,23 | 1,28 | 1.32 |
| HORTIX 1245 | Chamota | 1500 | 49 | 43 | 1 | 1,2 | 2,20 | 2,19 | -0,19 | 70 | 75 | 65 | 1,52 | 1,68 | 1,82 | 1,96 |
| HORTIX 1260 | Andalucita | 1600 | 61 | 36 | 0,7 | 1,5 | 2,72 | 2,65 | 0,20 | 90 | 95 | 72 | 1,61 | 1,67 | 1,72 | 1.88 |
| HORTIX 1265 | Andalucita | 1650 | 66 | 30 | 0,5 | 1,5 | 2,72 | 2,68 | 0,15 | 90 | 95 | 110 | 1,77 | 1,82 | 1,85 | 1,97 |
| HORTIX 1285 | Bauxita | 1600 | 82 | 12 | 1,3 | 1,8 | 2,80 | 2,75 | -0,15 | 100 | 120 | 130 | 2,35 | 2,41 | 2,42 | 2.58 |

TABLA 2. PROPIEDADES HORMIGONES AISLANTES

| Nombre del producto | Materia prima base | Tª máxima de trabajo (°C) | Análisis químico | | | | Densidad aparente | | Cambio lineal permanente | Resistencia a la compresión en frío | | | Conductividad térmica | | | |
|---------------------|--------------------|------------------------------|----------------------|------|-------|-----|--------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| | | | (% , base calcinada) | | | | En seco (g/cm³) | 1200 °C (g/cm³) | | 1200 °C (%) | 110 °C (MPa) | 800 °C (MPa) | 1200 °C (Mpa) | 200 °C (W/m°K) | 600 °C (W/m°K) | 1000 °C (W/m°K) |
| | | | Al2O3 | SiO2 | Fe2O3 | CaO | | | | | | | | | | |
| HORLITE 400 | Vermiculita | 950 | 18 | 53 | 6,2 | 23 | 0,45 | 0,40 | -1,20 | 0,4 | 0,35 | - | 0,05 | 0,10 | - | - |
| HORLITE 500 | Perlita | 870 | 17 | 60 | 2,2 | 19 | 0,50 | 0,48 | -1,00 | 1 | 0,8 | - | 0,12 | 0,16 | - | - |
| HORLITE 800 | Vermiculita | 1100 | 33 | 27 | 7,5 | 21 | 0,82 | 0,75 | -1,00 | 2,1 | 1,7 | - | 0,16 | 0,19 | 0,24 | - |
| HORLITE 1000 | Perlita | 1200 | 33 | 40 | 5 | 16 | 1,05 | 0,95 | -0,90 | 2 | 1,85 | - | 0,18 | 0,22 | 0,27 | - |
| HORLITE 1-0-6 | Vermiculita | 1100 | 31 | 20 | 11 | 24 | 0,55 | 0,52 | -0,60 | 1,2 | 1 | - | 0,11 | 0,15 | 0,18 | - |
| HORLITE 1-2-4 B | Agregados ligeros | 1200 | 31 | 34 | 8 | 16 | 0,93 | 0,90 | 0,50 | 2,5 | 2,8 | - | 0,18 | 0,22 | 0,25 | - |

TABLA 3. MÓDULOS DE FIBRA CERÁMICA

| Nombre del producto | Tª máxima de trabajo (°C) | Análisis químico | | | | Densidad aparente | | Cambio lineal permanente 1200 °C (%) | Conductividad térmica | | | |
|----------------------|----------------------------------|----------------------|-------|-------|---------|-------------------|-----------------|---|-----------------------|----------------|---------------|-----------------|
| | | (% , base calcinada) | | | | En seco (g/cm³) | 1200 °C (g/cm³) | | 400 °C (W/m²K) | 600 °C (W/m²K) | 800°C (W/m²K) | 1200 °C (W/m²K) |
| | | Al2O3 | SiO2 | Fe2O3 | CaO+MgO | | | | | | | |
| Módulo F.C 160 kg/m3 | 1400 | 46 | 70-80 | 1,5 | 18-25 | 0,160 | 0,15 | 0,50 | 0,15 | 0,26 | 0,31 | 0,54 |
| Módulo F.C 192 kg/m3 | 1400 | 46 | 70-80 | 1,5 | 18-25 | 0,192 | 0,18 | 0,50 | 0,12 | 0,21 | 0,30 | 0,44 |
| Módulo F.C 240 kg/m3 | 1400 | 46 | 70-80 | 1,5 | 18-25 | 0,240 | 0,23 | 0,50 | 0,10 | 0,16 | 0,19 | 0,34 |

TABLA 4. PROPIEDADES SILICATOS CÁLCICOS

| Nombre del producto | Tª máxima de trabajo | Análisis químico | | | | | Densidad aparente | | Cambio lineal permanente | Conductividad térmica | | | |
|---------------------|-------------------------------|----------------------|------|---------|-------|-----|-------------------|---------|-----------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| | | | | | | | | | | | | | |
| | (°C) | (% , base calcinada) | | | | | En seco | 1200 °C | 1000 °C | 400 °C | 600 °C | 800°C | 1000 °C |
| | | Al2O3 | SiO2 | Alcalis | Fe2O3 | CaO | (g/cm³) | (g/cm³) | (%) | (W/m²K) | (W/m²K) | (W/m²K) | (W/m²K) |
| SiCa 1000°C | 1000 | 3 | 46 | 1 | 0,5 | 43 | 0,250 | 0,23 | 1,50 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | - |
| SiCa 1100°C | 1100 | 3 | 47 | 1,1 | 0,3 | 43 | 0,285 | 0,24 | 1,50 | 0,10 | 0,16 | 0,20 | 0,22 |

TABLA 5. PROPIEDADES MICROPOROSOS

| Nombre del producto | Tª máxima de trabajo | Análisis químico | | | | | Densidad aparente | | Cambio lineal permanente | Conductividad térmica | | | |
|---------------------|-------------------------------|------------------------------|------|---------|-------|-----|-------------------|---------|-----------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | (% , base calcinada) | | | | | En seco | 1200 °C | | 1000 °C | 400 °C | 600 °C | 800°C |
| | (°C) | Al2O3 | SiO2 | Alcalis | Fe2O3 | CaO | (g/cm³) | (g/cm³) | (%) | (W/m²K) | (W/m²K) | (W/m²K) | (W/m²K) |
| Microporoso 1000°C | 1000 | Están formados por silicatos | | | | | 0,260 | 0,25 | 1,90 | 0,025 | 0,030 | 0,034 | - |
| Microporoso 1100°C | 1100 | | | | | | 0,290 | 0,25 | 1,90 | 0,028 | 0,034 | 0,042 | - |